



SİVAS
BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ



ISPEC 21.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING & NATURAL SCIENCES

5-9 / JULY / 2026
ÇEŞME / İZMİR / TÜRKİYE

CONFERENCE PROCEEDINGS BOOK



EDITORS

Prof. Dr. Tolga KARAKÖY
Assoc. Prof. Dr. Yeter ÇİLESİZ

**21th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING &
NATURAL SCIENCES**

LIBERTY PUBLISHING HOUSE

Date: 23.07.2026

Water Street Corridor New York, NY 10038

www.libertyacademicbooks.com

+1 (314) 597-0372

ALL RIGHTS RESERVED NO PART OF THIS BOOK MAY BE REPRODUCED IN ANY FORM, BY PHOTOCOPYING OR BY ANY ELECTRONIC OR MECHANICAL MEANS, INCLUDING INFORMATION STORAGE OR RETRIEVAL SYSTEMS, WITHOUT PERMISSION IN WRITING FROM BOTH THE COPYRIGHT OWNER AND THE PUBLISHER OF THIS BOOK.

© Liberty Academic Publishers 2025

The digital PDF version of this title is available Open Access and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits adaptation, alteration, reproduction and distribution for noncommercial use, without further permission provided the original work is attributed. The derivative works do not need to be licensed on the same terms.

adopted by Mariam Rasulan

ISBN: 979-8-89695-489-7

Copyright © 2026 by Liberty Publishing House All rights reserved

**21th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING &
NATURAL SCIENCES**

**21th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING &
NATURAL SCIENCES**

JULY 5-9, 2026 / İZMİR / ÇEŞME

PROCEEDINGS BOOK
(Abstracts & Full Texts)

EDITOR

Prof. Dr. Tolga KARAKÖY
Doç. Dr. Yeter ÇİLESİZ

ISBN: 979-8-89695-489-7

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21485592>

ISSUED: July 23, 2026

21th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING & NATURAL SCIENCES

EVALUATION PROCESS and POLICIES

All applications have undergone double blind peer review process. In addition, each paper was accepted and the process of publishing in the book was carried out through editorial oversight. The published papers were presented and discussed at the meeting.

Full texts and abstracts published in accordance with the Symposium Policy have been prepared in accordance with ethical rules and APA standards. Authors of all papers are both ethically and legally responsible.

PARTICIPANTS COUNTRIES

Türkiye, KKTC, Polonya, Pakistan, Fas, Cezayir, Nijerya, Bangladeş, Romanya, Arnavutluk, İsrail, Hindistan, Malezya, Ermenistan, İran, Sırbistan, Çin, Azerbaycan, Türkmenistan, Endonezya

TOTAL ACCEPTED ARTICLES: 136

The Number of Accepted Papers from Türkiye: 60
The Number of Accepted Full Papers from Other Countries: 76
The Number of Total Papers: 136

21th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING & NATURAL SCIENCES

ORGANIZING BOARD

Asst. Prof. Dr. Hatice Bekci (Kayseri University, Türkiye)

Asst. Prof. Dr. Dilek Şentürk Demirel (Dicle University, Türkiye)

Assoc. Prof. Dr. Magdalena Skonieczna (Silesian University of Technology, Poland)

Asst. Prof. Dr. Mateusz Smolarz (Institute of Physiotherapy and Health Sciences, Poland)

Asst. Prof. Dr. Katarzyna Cesarz-Andraczke (Silesian University of Technology, Poland)

Dr. Muhammed FAIZAN (A Central University, India)

Dr. Małgorzata Musztyfaga-Staszuk (Silesian University of Technology, Poland)

**21th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING &
NATURAL SCIENCES**

SCIENCE AND ADVISORY BOARD

Prof. Dr. Hakan Özkan (Çukurova Üniversitesi)

Prof. Dr. Faruk Toklu (Çukurova Üniversitesi)

Prof. Dr. Nafiz Çeliktaş (Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi)

Prof. Dr. Ercan Ceyhan (Selçuk Üniversitesi)

Prof. Dr. Disna Ratnasekera (University of Ruhuna)

Prof. Dr. Hirofumi Saneoka (University of Hiroshima)

Prof. Dr. Marian Brestic (Slovak University of Agriculture)

Prof. Dr. M. Shohidul Islam (Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University)

Prof. Dr. Oksana Sytar (Taras Shevchenko National University of Kyiv)

Assoc. Prof. Dr. Selma Toker Kutay (Çukurova Üniversitesi)

Assoc. Prof. Dr. Sina Besharat (University of Urmia)

Dr. Berfin KILINÇ (Kırıkkale University)

Dr. Adnan Akhter (University of Punjab)

Dr. Alfonso Cuesta Marcos (Bayer Crop Science)

Dr. Akbar Hossain (Bangladesh Wheat And Maize Research Institute)

Dr. Adnan Akhter (University of Punjab)

Dr. Hicran Refiyeva Latif (Bakü State University, Azerbaijan)

21th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING & NATURAL SCIENCES

JULY 5-9, 2026 / İZMİR / ÇEŞME

CONGRESS PROGRAM

Online (with Video Conference) Presentation

Meeting ID: 862 6236 6905 / Passcode: 012345

<https://us02web.zoom.us/j/86262366905?pwd=7Pqpaw9qXjpYzXXET0RqxedZfjdZzM.1>



IMPORTANT, PLEASE READ CAREFULLY

- To be able to make a meeting online, login via <https://zoom.us/join> site, enter ID instead of “Meeting ID or Personal Link Name” and solidify the session.
- The Zoom application is free and no need to create an account.
- The Zoom application can be used without registration.
- The application works on tablets, phones and PCs.
- Moderator - responsible for the presentation and scientific discussion (question-answer) section of the session.

Points to Take into Consideration - TECHNICAL INFORMATION

- Make sure your computer has a microphone and is working.
- You should be able to use screen sharing feature in Zoom.
- Attendance certificates will be sent to you as pdf at the end of the congress.
- Requests such as change of place and time will not be taken into consideration in the congress program.
- **(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)**
- Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
- **Before you login to Zoom please indicate your name_surname and HALL number, exp. Hall 1, Gülen**

06.07.2026
Ankara Local Time: 10:00-12:00

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.

IN-PERSON SESSION

Veue: Sisus Marina Hotel
HALL-1

MODERATOR: Dilek Şentürk Demirel

AUTHOR	AFFILITION	ABSTRACT TITLE
Mihrinur Yapıcı Bükay Yenice Gürsu Kürşat Osman Ay Betül Yılmaz Öztürk Ilknur Dağ	Eskisehir Osmangazi University	Detailed Dynamic Characterization Of Candida Parapsilosis Biofilm Formation And Development Using Surface Enhanced Raman Spectroscopy (Sers)
Bükay Yenice Gürsu Mihrinur Yapıcı Kürşat Osman Ay Betül Yılmaz Öztürk Ilknur Dağ	Eskisehir Osmangazi University	Isolation And Electron Microscopic Characterization Of Extracellular Matrix From Staphylococcus Aureus Biofilm
Badegül Tunçay	Sivas Science And Technology University	Investigation Of The Effect Of Mechanical Milling Time On The Powder Particle Morphology Of Aa7075 Aluminum Alloy
Songül Gürsoy Dilek Şentürk Demirel	Dicle University	Recent Advances In Animal Feed Processing Techniques And Equipment
Belgin Coşge Şenkal	Yozgat Bozok University	Safflower (Carthamus Tinctorius L.) Cultivation And Multipurpose Use Potential
Belgin Coşge Şenkal	Yozgat Bozok University	Evaluation Of The Relationships Between Seed Yield And Yield Components In Safflower (Carthamus Tinctorius L.) Grown Under Rainfed (Non-Irrigated) Conditions Using Multivariate Analysis Methods)
Kağan Tolga Cinisli	Atatürk University	Next-Generation Analyses In Regenerative Agriculture: Sap Analysis And Haney Test
Bahar Kuloğlu	Sivas Science And Technology University	The Q-Analogue Of The Terraced Rhaly Matrix
Aysen Koç Zeliha Özkan	Yozgat Bozok University	The Effect Of Different Iba Doses And Bacterial Application On The Rooting Of Chokeberry Wood Cuttings
Aysen Koç Sebahat Yeter	Yozgat Bozok University	The Effect Of Different Iba Doses And Bacterial Application On The Rooting Of Black Mulberry Wood Cuttings
Emine Sema Çetin Öznur Yetişir Berna Keles	Yozgat Bozok University	The Effect Of Silicone Nanoparticle Application On Secondary Metabolite Production In Michele Palieri Grape Variety
Emine Sema Çetin Orhan Yılmaz Berna Keles	Yozgat Bozok University	Investigation Of The Effects Of Kaolin Applications On Grape Berry Composition In Grapevines
Hatice Bekci	Kayseri University	Research On The Biological Activities Of Humulus Lupulus Plant
Ebru Yabaş	Cumhuriyet University	A Facile And Efficient Synthetic Strategy For Phthalocyanines: Synthesis, Optical Properties, And Structure–Property Relationships
Ebru Yabaş	Cumhuriyet University	Carbon-Based Phthalocyanine Hybrids: Multifunctional Materials For Future Defense Technologies
Zehra Meliha Tengiz Bekir Ayyıldız Merve Ayyıldız	Yozgat Bozok University	The Role Of Pesticide Dealers In The Agricultural Input Supply Chain And Producer Preferences: The Case Of Kırıkkale Province

ONLINE SESSIONS

06.07.2026 / SESSION-1, HALL-3**Ankara Local Time: 10:00-12:00**

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)

Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.

Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,

exp. Hall 1, Samet Kuşkıran**MODERATOR: Didem Altun****Meeting ID: 862 6236 6905****Zoom Passcode: 012345**

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Ferhat Atik	Girne American University	Algorithmic Opinion Formation: How Platform Architectures Shape Collective Belief Systems
Didem Altun Kenan Altun	Sivas Cumhuriyet University	Adaptive Control Of Induction Heating Systems
Didem Altun Kenan Altun	Sivas Cumhuriyet University	Comparison Of Series-Parallel Resonant Circuits In Induction Heating Systems
Güliz Türkmenoğlu	Alanya Alaaddin Keykubat University	Ethnobotanical Characteristics Of Some Plant Taxa In The Adana (Türkiye) Region
Güliz Türkmenoğlu	Alanya Alaaddin Keykubat University	Ethnobotanical Characteristics Of Some Plant Taxa In The Manisa (Türkiye) Region
Memduh Karalar Gülşah Çufalı	Zonguldak Bulent Ecevit University	Dynamic Effects Of Arch Shape In Structural Assessment Of Historical Stone Bridges Using Finite Element Method
Tuğba Şanlı Betül Kafkaslıoğlu Yıldız Elif Işık Yahya Kemal Tür	Sivas University Of Science And Technology	The Effect Of Sm2O3 And ZrO2 Additives On The Ballistic Performance Of Al2O3 - Based Ceramics
Zeynep Aydın Mine Doğan Yunus Güral	Fırat University	Digital Relationships: A Qualitative Study On The Transformation Of Young People's Perceptions Of Relationships

06.07.2026 / SESSION-1, HALL-4**Ankara Local Time: 10:00-12:00**

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)

Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.

Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,

exp. Hall 1, Samet Kuşkıran**MODERATOR: Hale Günaçtı****Meeting ID: 862 6236 6905****Zoom Passcode: 012345**

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Şeyma Yalçinkaya Ramiz Gültekin Akay Çiğdem Karadağ	Kocaeli University	Synthesis And Characterization Of Microwave-Assisted Ptco/Graphene Core–Shell Catalysts For Proton Exchange Membrane Fuel Cells
Hale Günaçtı	Sivas Bilim Ve Teknoloji University	Rhizoctonia Root And Crown Rot Of Sugar Beet In Sivas
Hale Günaçtı	Sivas Bilim Ve Teknoloji University	Cercospora Leaf Spot Disease In Sugar Beet: A Global Perspective
Ömer Sözen Yeter Çilesiz Tolga Karaköy	Sivas Bilim Ve Teknoloji University	Development Of Climate Change-Resilient/Tolerant Chickpea Genotypes
Yeter Çilesiz Ömer Sözen Tolga Karaköy	Sivas Bilim Ve Teknoloji University	Development Of Climate Change-Resilient/Tolerant Soybean Genotypes
Tolga Karaköy Yeter Çilesiz Ömer Sözen	Sivas Bilim Ve Teknoloji University	Revealing The Relationships Among Yield Components In Some Soybean Genotypes Through Correlation Analysis
Ömer Sözen Tolga Karaköy	Sivas Bilim Ve Teknoloji University	Revealing The Relationships Among Yield Components In Some Soybean Genotypes Through Path Analysis
Emrah Aksu Kamil Aykutalp Gündüz Fatih Başçiftçi	Selçuk University	Network Security, Firewalls, Intrusion Detection And Prevention Systems (Ai-Powered Studies)
Emrah Aksu Fatih Başçiftçi	Selçuk University	Philosophical, Pedagogical, And Hardware Synthesis Of Virtual Reality Technologies: A Computer Engineering Perspective

06.07.2026 / SESSION-1, HALL-5
Ankara Local Time: 10:00-12:00

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Muhammad Faisal



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Musa M. Kamara	Oriental Studies–African Studies, Warsaw	Sociolinguistic Shift Of Liberia: The Displacement Of Indigenous Languages By Liberian Pidgin English In Monrovia
Muhammad Faisal	Allama Iqbal Open University	Algorithmic Fairness In Poverty Targeting Auditing The Bisp Proxy Means Test (Pmt) For Bias
El Mostafa Benharaf Ahmed Arif Kaoutar Ouahibi Erradi El Mostafa Ayoub Cherrat Abdellah Zeroual Mohammed El Idrissi	Sultan Moulay Slimane University	Use Of Quinoxaline To Improve The Efficiency Of Dye-Sensitized Solar Cells
Titilayo I. Jesusina Khadijat T. Dauda Enobong R. Essien Violette N. Atasie	Bells University Of Technology	Corrosion Inhibition Potential Of Casuarina Equisetifolia Leaf Extract On Mild Steel In Acidic Medium.
Md Azizul Islam Saiful Islam Md. Jakir Hossain	Jatiya Kabi Kazi Nazrul Islam University	Impact Of Over-Usage Of Pesticides In Crops Cultivation On Farmers' Health Conditions: A Sociological Analysis In Bangladesh
Major Gheorghe Giurgiu Prof Dr Med Manole Cojocaru	Titu Maiorescu University	Optimizing Outcomes In Psoriasis: Impact Of Deniplant Nutraceuticals
Safinez Boutrid	University Of Batna 2	Acetaminophen-Induced Oxidative Liver Injury In Wistar Rats And Its Attenuation By Vitamin C
Samira Boumous Zouhir Boumous Sabrine Morakeb Rayane Yasmine Mahfoudi	University Of Souk Ahras	Contribution To Lv Voltage Regulation By Storageless Pv Inverters: Limitations Of The Q (U) Characteristic Curve And A Solution Using Transient Capacitive Reactive Power Injection

06.07.2026 / SESSION-1, HALL-6
Ankara Local Time: 10:00-12:00

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Isaiah Baba Musa



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Zouhir Boumous Samira Boumous Rayane Yasmine Mahfoudi Sabrine Morakeb	University Of Souk Ahras	Physics-Informed Explainable Deep Learning Framework For Early Fault Detection And Prognostics In Dfig-Based Wind Farms
Mohammed Mesnoui Ourida Benouamane Chawqi Benchikh Messaoud Roumani Tarek Ot-Man Ouahiba Mizab Reguia Zeguerrou Mohammed Bouzouina	University Of Abdelhamid Ben Badis Of Mostaganem	Optimization Of Slow Pyrolysis Conditions For Producing High-Quality Biochar From Date Palm Residues
Grigorina Boce	Mediterranean University Of Albania	Cybersecurity In Intelligent Public Transport Systems In Albania: Challenges, Risks, And A Secure Its Framework
Badre Zinaoui Pr.Labjar Najoua Pr.El Hajjaji Souad Elabbari Chaimaa	Mohammed V University In Rabat	Integrated Solar Desalination With Thermal Storage And Energy Recovery
Isaiah Baba Musa	Federal University Of Technology	Heavy Metal Contamination And Pollution Assessment Of Soils Around Gold Mining Sites In Minna And Kataereggi, North-Central Nigeria
Valery V. Belakhov	Israel Institute Of Technology	Application Of Heptaene Macrolide Antibiotic Aureofungin In Agriculture As Highly Effective Ecologically Safe Fungicide For Plant Protection
Ibrahim Sani Dikko	Umaru Musa Yar'adua University Katsina	Biochemistry As The Bedrock Of Life Sciences: Its Role In Health, Agriculture, And Biotechnology
Sumayya Akram Matloob Ahmad Sana Aslam	Government College University Faisalabad	Synthesis And Biological Evaluation Of Pyridylpiperazine-Based Carbodithioates As Urease Inhibitors

06.07.2026 / SESSION-1, HALL-7
Ankara Local Time: 10:00-12:00

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Huma Ikram



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Huma Ikram Rumaisa Zakir Darakhshan J. Haleem	University Of Karachi	Responsiveness Of 5ht-1a Receptors In Adult Rats Following Prenatal Stress Induced Susceptibility To Apomorphine Addiction
Major Gheorghe Giurgiu Manole Cojocaru	Deniplant-Aide Sante Medical Center	The Gut-Brain-Skin Axis In Acne: Impact Of Polenoderm
Afshan Butt Afshan Naseem	University Of Management And Technology	Technology Integration In Secondary Stem Classrooms: Examining The Role Of Teacher Demographics
Balasubramani G L Rinky Rajput Manish Gupta Pradeep Dahiya Jitendra K Thakur Rakesh Bhatnagar Abhinav Grover	Jawaharlal Nehru University	Structure-Based Drug Repurposing To Inhibit The Dna Gyrase Of Mycobacterium Tuberculosis
Poh-Yee Loh Payam Shafigh Muhammad Aslam Mohamad Rizal Baharum	Universiti Malaya	Beyond The Phenolphthalein Test: A Critical Comparison Of Concrete Carbonation Assessment Methods
Mouad Lazrak Ghita Ait Baddi Maryam Mirouch Ayour Jamal Dhin Ikram Soukaina Kaoui Chebli Bouchra	Ibn Zohr University	Enhancing Olive Pomace Composting Using Natural Biochar: Experimental Evaluation Under Pilot-Scale Conditions
Nodar Sulashvili Margarita Beglaryan Maka Buleishvili Magda Davitashvili Nodar Mitagvaria Vira Kravchenko Marika Sulashvili Nato Alavidze Nino Abuladze Igor Seniuk Nana Gorgaslidze David Aphkhazava	Yerevan State Medical University	Scientific Perspectives From Engineering & Natural Sciences On The Synergy Between Environmental Engineering And Eco-Urbanism: Enabling Adaptive, Low-Carbon, Resilient, Sustainable, And Climate- Responsive Urban Systems

06.07.2026 / SESSION-2, HALL-3
Ankara Local Time: 12:30-14:30

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Caner Taçoğlu



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Caner Taçoğlu	Izmir University Of Economics	Risk-Aware Criteria Prioritization For Temporary Warehouse Decisions In Lubricant Oil Supply Chains
Duygu Sinanç Terzi	Ankara University	Plant Classification With Dinov3 Under Imbalanced Class Distributions
Bekir Sıtkı Şirikçi Zehra Meliha Tengiz Mesut Ogun	Yozgat Bozok University	Production And Marketing Structure Of Amasya Misket Apple: The Case Of Çamardı District In Niğde Province
Ali Ihsan Çelik İsmail Ünsal Mehmet Fatih Şahan	Kayseri University	Elevated Service Temperature Effects On Impact Behavior Of Rap-Substituted Geopolymer Concrete
Neslihan Beyazıt Azra Kıyak	Hatay Mustafa Kemal University	In Silico Investigation Of The Inhibitory Activities Of Benzofuran-Based Heterocyclic Hybrid Compounds Against Cholinesterase Enzymes Involved In Alzheimer's Disease

06.07.2026 / SESSION-2, HALL-4**Ankara Local Time: 12:30-14:30**

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)

Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.

Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,

exp. Hall 1, Samet Kuşkıran**MODERATOR: Ozan Akat****Meeting ID: 862 6236 6905****Zoom Passcode: 012345**

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Ali Baran Dönmez Hatice Siçramaz Ayşen Can	Sakarya University	Investigation Of The Effects Of Different Sterilization Methods On The Final Product In Uht Milk Production
Ege Öztetik Sami Atici Hakan Arslan	Kırıkkale University	Investigation Of Dynamic Behaviors And Forced Vibration Characteristics Of Vibratory Bowl Feeders
Caglar Dere	Izmir Kâtip Çelebi University	Integration Of Dual Fuel Marine Engines And Fuel Cell For Maritime Decarbonisation
Ozan Akat Muhlis Sezgin Selime Ölmez Bayhan Erol Bayhan	Tarım Ve Orman Bakanlığı	A Regional Assessment Of Plant Protection Product Use Trends In The Gap Region, Türkiye (2016–2024)
Muhlis Sezgin Ozan Akat Merve Akyildiz Selime Ölmez Bayhan Erol Bayhan	Tarım Ve Orman Bakanlığı	Toxic Effects Of Some Pesticides On The Eggs Of Nabis Pseudoferus Orientarius Remane, 1962 (Hemiptera: Nabidae)
Sueda Eslem Kurt Fatih Erdem Baştan	Sakarya University	Modification Of Silicon Nitride Particle Surfaces Of Different Sizes With A Calcium Phosphate Layer
Sezer Barış Yıldırımır Ahmet Feyzioğlu Hüseyin Haliloğlu	Marmara University	Ahp-Based Evaluation Of The Industrial Symbiosis-Oriented Environmental Sustainability Performance Of Different Fdm Designs Generated By The Generative Design Method
Şevki Taşkın	Gaziantep University	Experimental Investigation Of Fresh And Hardened Concrete Properties With Different Cement Types And Assessment Of Carbon Emissions
Mehmet Fatih Yılmaz Mahmut Kaplan Abdullah Yasin Dalkılıç	Malatya Turgut Özal University	Some Botanical Characteristics Associated with Herbage Yield of Fenugreek (Trigonella foenum-graecum L.) Genotypes Collected from Kahramanmaraş Natural Flora
Dudunur Ertargın Fehmi Kozveren Emrah Koç Beyhan Akın Fatma Aykut Tonk	Ege Üniversitesi	Farklı Tane Rengine Sahip Ekmeklik Buğday (Triticum Aestivum L.) Genotiplerinde Bayrak Yaprak Alaninin Değerlendirilmesi

06.07.2026 / SESSION-2, HALL-5
Ankara Local Time: 12:30-14:30

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Drini Shehi



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Drini Shehi Edmont Çeliku	University Hospital Centre “Mother Teresa”	One-Stage Laparoscopic Management Of Gallbladder And Common Bile Duct Stones
Kristi Trako Iilir Bibolli Jovan Basho	University Hospital Centre “Mother Teresa”	Tenofovir Therapy In Hepatitis B-Related Liver Cirrhosis
Tedi Minarolli Birkena Qirjazi	University Hospital Centre “Mother Teresa”	Sinonasal Disease With Orbital Extension
Samaneh Mahmood-Aghdam Mina Gholami Alireza Ahmadi Hedieh Rahmati Mehrnaz Izadpanah Abdolreza Daneshvar Amoli	Human And Animal Cell Bank	Establishment Of Lymphoblastoid Cell Lines From Spinal Muscular Atrophy (Sma) Patients: A Biobank Resource For Genetic Studies And Therapeutic Development
Fatima-Ezzahra Jaayefar Jamila Dahmani	Ibn Tofail University	Data Capitalization On Thymus Maroccanus: Phytochemical Composition, Anticandidal Activity, And Synergistic Potential With Conventional Antifungals
Fatima-Ezzahra Jaayefar Fatima El Hilah Jamila Dahmani	Ibn Tofail University	Data Capitalization On Leontodon Saxatilis: Ecotypic Differentiation And Phenotypic Plasticity As Drivers Of Invasiveness
Muhammad Aslam Payam Shafigh Azlan Shah Ali Yilang Liu	Wenzhou University Of Technology	An Overview Of The Strength And Durability Properties Of Timber In Marine Environment
Frida Zisko	Mediterranean University Of Albania	From Model-Centric To Data-Centric Ai:A Systematic Review And Framework For Customer Behavior Prediction In Telecom

06.07.2026 / SESSION-2, HALL-6
Ankara Local Time: 12:30-14:30

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Dimitrije Radjenović



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Benyahia Amar Benyahia Abdessetar	University Of Saad Dahlab- Blida 1	Mechanical And Physical Performance Of Eco-Friendly Mortars Enhanced With Waste Tire Rubber And Redispersible Polymer Powders
Tahri Nouhayla Mikou Karima Nabloussi Abdelghani	Sidi Mohamed Ben Abdellah University	Screening Ems-Induced Sesame (Sesamum Indicum L.) Mutants For Low-Temperature Tolerance At Germination
Emmanuel Tomisin Bello Majekodunmi Rachael Adedayo	Thomas Adewumi University	Antibacterial Activity Of Dryopteris Fern- Caped Silver Nanoparticles Against S. Aureus And E. Coli
Dimitrije Radjenović	University Of Belgrade	Simulation Of Fluid Flow With Free Surfaces Using Lie Advection And Implicit Functions
Monika Lopuszanska-Dawid Paweł Tomaszewski Katarzyna Milde Patrycja Wiślak Janusz Dobosz Bartosz Molik	Józef Piłsudski University Of Physical Education In Warsaw	Parents' Bmi Vs. Child's Bmi:Results Of The Polish National Project „Physical Education With University Of Physical Education” (Pe With Upe)
Marija Radmilović- Radjenović Branislav Radjenović Darko Vasiljević Bojana Bokić Branko Kolarić	University Of Belgrade	Geometry-Driven Thermodynamics In Nanostructured Materials
Md. Mahamudur Rahman Papon	American East Coast University	Understanding The Relationship Between Structural Damage And Soil Liquefaction In Urban Areas By Analyzing The Characteristics Of Ground Motion
Ngueya Essallami Ahmed Khouya M'barka El Mouedden Mohamed Daoudi	Abdelmalek Essaâdi University	Governance And Strategic Planning Of Renewable-Powered Desalination Systems: Implications For Public Water Management

06.07.2026 / SESSION-2, HALL-7
Ankara Local Time: 12:30-14:30

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Bashiru Muhammad Liman



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Bashiru Muhammad Liman	Shehu Shagari University Of Education	Challenges Of Organizing Guidance And Counselling Programmes In Some Selected Tertiary Institutions In Sokoto State: Need For Casson Interventions
Fatima Mustapha Bindawa Abubakar Sani	Umaru Musa Yar'adua University	A Literature Review On Bauhinia Rufescence Leaves Used For Anti-Malarial Activity
M.K.Vijayalakshmi S.Rubin Thara N.Arshad Ahamed E.Praveena R.Swathi	Bharath Institute Of Higher Education And Research	Neuropharmacology Of Brain-Computer Interfaces: Emerging Therapeutic Strategies And Future Perspectives
V Keerthana Ameerah Avinash R Saravanan		Skin Toxicities Of Targeted Therapies In Oncology: A Review Of Clinical Presentation And Management
Iram Liaqat	Govt. College University	Flagellar Motility Controls Biofilm Formation By Bacillus Cereus And Yersinia Enterocolitica
Yetunde Kemi Timothy	University Of Abuja	Integrating Artificial Intelligence And Robotics Into Resources-Limited Healthcare System
David Yusuf Hassan	Federal University Dutse	Combine Efficacy Of Aqueous Mango And Neem Leaves Extract Against S. Aureus
Fatima El Hilah Nadia Belahbib Jamila Dahmani Lalla Aicha Lrhorfi	Ibn Tofail University	Medicinal Plants From The Mediterranean And North Africa : Natural Alternatives Against Antimicrobial Resistance
Davies-FolorunsoTesleemah.O. Folorunso Jamiu.B. Adekola, Saheed.A Muhibi, Musa.A. Abduljamih-Folorunso, Maryam.T. Abduljamih-Folorunso, Zainab.T.	Lagos State Health Service Commission	Advocacy For Voluntary Non Remunerated Blood Donors As The Safest Source Of Blood Transfusion In Nigeria : A Review

06.07.2026 / SESSION-3, HALL-3**Ankara Local Time: 15:00-17:00**

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)

Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.

Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,

exp. Hall 1, Samet Kuşkıran**MODERATOR: Ipek Balnan****Meeting ID: 862 6236 6905****Zoom Passcode: 012345**

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Ipek Balnan	Sivas University Of Science And Technology	Recent Advances In Neuromorphic Photodetectors For Artificial Vision And In-Sensor Computing
Ipek Balnan	Sivas University Of Science And Technology	Mos ₂ -Based Neuromorphic Photodetectors: Mechanisms And Applications
Eyyup Gerçekcioğlu Mehmet Albaşkara Gökhan Çolak	Erciyes University	Effects Of Surface Roughness And Lubricant Viscosity On The Hydrodynamic Lubrication Performance Of Radial Journal Bearings
Sibel Demir Hakkı Osman Necipoğlu Ömür Alkan	Yıldız Technical University	Effect Of Pre-Braiding Process Chemical Coating Application On The Friction Performance Of Braided Uhmwpe Crane Ropes
Yaren Emine Keskin Karakuş Zerrin Pat	Bilecik Şeyh Edebali University	Investigation Of Removal Conditions For Reactive Orange 16 Dye From Textile Wastewater Using Activated Carbon Derived From NaCl-Activated Eriobotrya Japonica (Loquat) Biomass
Abdullah Salem Vural Emir Kafadar Eser Olğar	Gaziantep University	Acoustic And Mechanical Properties Of Sukkari Date Seed Powder-Reinforced Polyester Biocomposites
Ayşenur Demir Elvan Ender Altay	Uludağ University	A Landscape Design Proposal For Connectivity And Public Space Integration In Coastal Areas: The Tirilye Case Study

06.07.2026 / SESSION-3, HALL-4**Ankara Local Time: 15:00-17:00**

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)

Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.

Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,

exp. Hall 1, Samet Kuşkıran**MODERATOR: Zeynep Bulut****Meeting ID: 862 6236 6905****Zoom Passcode: 012345**

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Ceren Karaburun Elvan Ender Altay	Bursa Uludağ University,	Landscape Design Parameters For Enhancing Social Interaction In Public Open Space
Uğur Can Gökcan Ayhan Oral	Çanakkale Onsekiz Mart University	Preparation Of A Nanofibrous Material For Glucose Detection
Hasan Üstün Başaran Aytekin Duranay	Izmir Katip Celebi University	An Overview Of The Applications Of Current Wind-Assisted Propulsion Technology In Modern, Energy-Efficient Ships
Zeynep Bulut Gülcan Akal Seval Kontaş Yedier Ceren Börçek Kasurka Nihan Küçük Yılmaz Zülal Atlı Şekeroğlu	Ordu University	The Effects Of Hemp Seed Extract On Toxicity And Apoptosis In Triple-Negative Breast Cancer Cells (Mda-Mb 231)
Gülcan Akal Zeynep Bulut Seval Kontaş Yedier Ceren Börçek Kasurka Nihan Küçük Yılmaz Vedat Şekeroğlu	Ordu University	The Effects Of Aronia Extract On Toxicity And Oxidative Stress In Triple-Negative Breast Cancer Cells (Mda-Mb 231)
Kübra Köşe Kaya	Sivas Bilim Ve Teknoloji University	Microwave-Assisted Photocatalyst Design: Crystal-Phase Control, Defect Engineering, And Morphological Regulation For Enhanced Photocatalytic Performance
Kübra Köşe Kaya	Sivas Bilim Ve Teknoloji University	Microwave-Assisted Interfacial Engineering Of Photocatalysts: Heterojunction Construction, Carbonaceous Supports, And Charge-Transfer Pathways
Murat Kırınşan	Gümüşhane University	Sustainable Photocatalytic Treatment Of Disperse Blue 56 Contaminated Wastewater Using Cao Nanoparticles: Performance Optimization, Kinetic Evaluation And Mechanistic Insights

06.07.2026 / SESSION-3, HALL-5
Ankara Local Time: 15:00-17:00

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Parisa Zafari



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
K. P. Thevikka N. Manjula Perachi Devi S. Rubin Thara	Bharath Institute Of Higher Education And Research	Pharmacogenomics And Precision
Ethirajan Barani G Priya S Indhu Murugesan Kamaraj	Srm Institute Of Science And Technology	Crispr/Cas9-Mediated Pd-1 Gene Knockout In Jurkat T Cells Enhances Anti-Tumor Immune Response Against Triple-Negative Breast Cancer Cells
S Indhu G Priya Ethirajan Barani Murugesan Kamaraj	Srm Institute Of Science And Technology	Plant, Microbe And Insect Interactions From The Chemical Perspective: Approaching Through Endophytes, Allelochemicals, Soil Microbes And Their Metabolites For Sustainable Resistance Against Pests
Undang Yogi Nirwanto Ristina Siti Sundari Kania Nanda Oktaviani Rizky Adi Nugraha Tarigan	Universitas Siliwangi	Sustainable Fertilization: Synergy Of Tofu Waste Lof And Npk On Cucumber Growth, Yield, And Agribusiness Benefit
Parisa Zafari	Hamadan University Of Medical Sciences	Relationship Between Vitamin D Plasma Level And Foxp3 Gene Expression Among Rheumatoid Arthritis Patients
Parisa Zafari	Hamadan University Of Medical Sciences	The Association Between The Plasma Sugar And Lipid Profile With The Gene Expression Of The Regulatory Protein Of Mtor (Raptor) In Patients With Rheumatoid Arthritis
Yusuf Ahmed Tijjani Isyaku Idris	Ahmadu Bello University	Do Governance And Policy Commitment Enhance Sustainable Wash Outcomes? The Moderating Role Of Funding Effectiveness In Katsina State's Surwash Programme
Ilham Chennak Soufiane Tahiri Mohammed El Krati Samah Ait Benichou	Chouaïb Doukkali University	Humic Substances Derived From Municipal Solid Waste Compost As Natural Biostimulants For Tomato And Alfalfa Seed Germination

06.07.2026 / SESSION-3, HALL-6
Ankara Local Time: 15:00-17:00

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Samir Badiyev



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILITION	ABSTRACT TITLE
Hasanov Elgun Kamil Tamrazli Tamkin Tamraz Alizade Rufana Asif Gasimov Vugar Jafar Abbasova Khayala Adil	Institute Of Petrochemical Processes Named After Yu.H. Mammadaliyev	Experimental Investigation Of Oil- Collecting Capacity Of Ni And Co- Containing Surface-Active Compositions Synthesized On The Basis Of Technical Petroleum Acids In Oil–Water Systems
Samir Badiyev Samad Safarov	Azerbaijan Technical University	Application Of Pso-Optimized Pid Controller To Non-Linear Dynamic Systems
Mohamed El Morsy Laila Afia	Ibnou Zohr University	Strategies For Emission Reduction In Industrial Steam Generation Systems
Manar Souhair Samira Zaoui Malek Shahwan	Mohammed V University	Fostering Learner Autonomy In Tafl: Cognitive Mapping And Interactive Modalities In The Bareq Platform
K. Vignesh	Palar Agricultural College	Thermal Imaging To Detect Pathogen- Induced Stress
Isah Shamsudeen Idris Fatima Safirat Madaki	Umaru Sanda Ahmadu College Of Education Minna	Impact Of Electricity Supply Instabilty On The Financial Performance Of Small And Medium Enterprises (Smes) In Niger State, Nigeria
Md Ayub Sheikh Sudhangshu Chakraborty	Central Calcutta Polytechnic	Complex Impedance And Dielectric Relaxation Behavior Of Sodium Silicate (Na ₂ SiO ₃) Under Thermal Activation
Adekola Saheed A. Yahaya Gobir Kola Musah Khadijat Toyin Olaniyan Mathew Folaranmi Oparinde Dolapo Pius	University Of Abuja	Vitamin D, Calcium, And Prostate Cancer Among African Men: A Review
Djenaoui Abdelatif Reffad Hamza Alti Adel	University Ferhat Abbas Sétif 1	Hierarchical Blockchain-Based Security Framework For On-Demand Iot Services In Cloud-Assisted Healthcare

06.07.2026 / SESSION-3, HALL-7
Ankara Local Time: 15:00-17:00

(All speakers required to be connected to the session 15 min before the session starts)
Moderator is responsible for ensuring the smooth running of the presentation, managing the group discussion and dynamics.
Before you login to Zoom please indicate your name_surname and hall number,
exp. Hall 1, Samet Kuşkıran

MODERATOR: Ghazaleh Elahi



Meeting ID: 862 6236 6905
Zoom Passcode: 012345

AUTHOR	AFFILIATION	ABSTRACT TITLE
Lovleen Gupta Santosh Kumar	University Of Delhi	Energy Market Volatility, Fossil Fuel Dependence, And Stock Market Crash Risk
Amit Kumar Singh Lovleen Gupta Mamta Dhanda	University Of Delhi	From Public Finance To Corporate Finance: Influence Of Green Municipal Bonds (Gmb) Issuance On The Financial Structure Of Indian Municipal Corporations
Ghazaleh Elahi Mehrdad Gholami	Golestan University Of Medical Sciences	Antimicrobial Resistance, Virulence Gene Profiling, And Genetic Diversity Of Multidrug-Resistant Pseudomonas Aeruginosa Isolates In Mazandaran, Iran
Ghazaleh Elahi Abdollah Ardebili	Golestan University Of Medical Sciences	Antimicrobial Photodynamic Effect Of The Photosensitizer Riboflavin, Alone And In Combination With Colistin, Against Pandrug-Resistant Pseudomonas Aeruginosa Clinical Isolates
Dovletova Shirinjemal Melebayeva Oguljennet	Oguz Han Engineering And Technology University Of Turkmenistan	Development Of A Natural Bioindicator From Pomegranate Peels For Sustainable Ph Detection
Dovletova Shirinjemal Yuldashov Bahadir	Oguz Han Engineering And Technology University Of Turkmenistan	Sustainable Fabrication Of A Natural Polymer-Based Bioplastic Using Agar, Gelatin, And Glycerin: A Low-Cost Approach To Eco-Friendly Material Design
R. Devadharshini Meenatchi.S Gomathy E W.Helen	Bharath Institute Of Higher Education And Research	Cervical Cancer Prevention And Hpv Vaccination
Amit Kumar Singh Mukesh Kumar	University Of Delhi	Algorithmic Financial Literacy: A Conceptual Framework For Integrating Ai Into Personal Financial Planning
Atikah Suwanda, S.Si. Hardoko Insan Qudus, M.S. Sutopo Hadi	University Of Lampung	Electrophilicity As A Predictor Of Bioactivity: Chemical Reactivity Study Of Organotin(Iv) 4-Nitrobenzoate Compounds Using Cyclic Voltammetry
Ivanka Hadžić Ivan Pavlović	Scientific Institute Of Veterinary Medicine Of Serbia	Importance Of Hoof Health In Cattle Milk Production

SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS



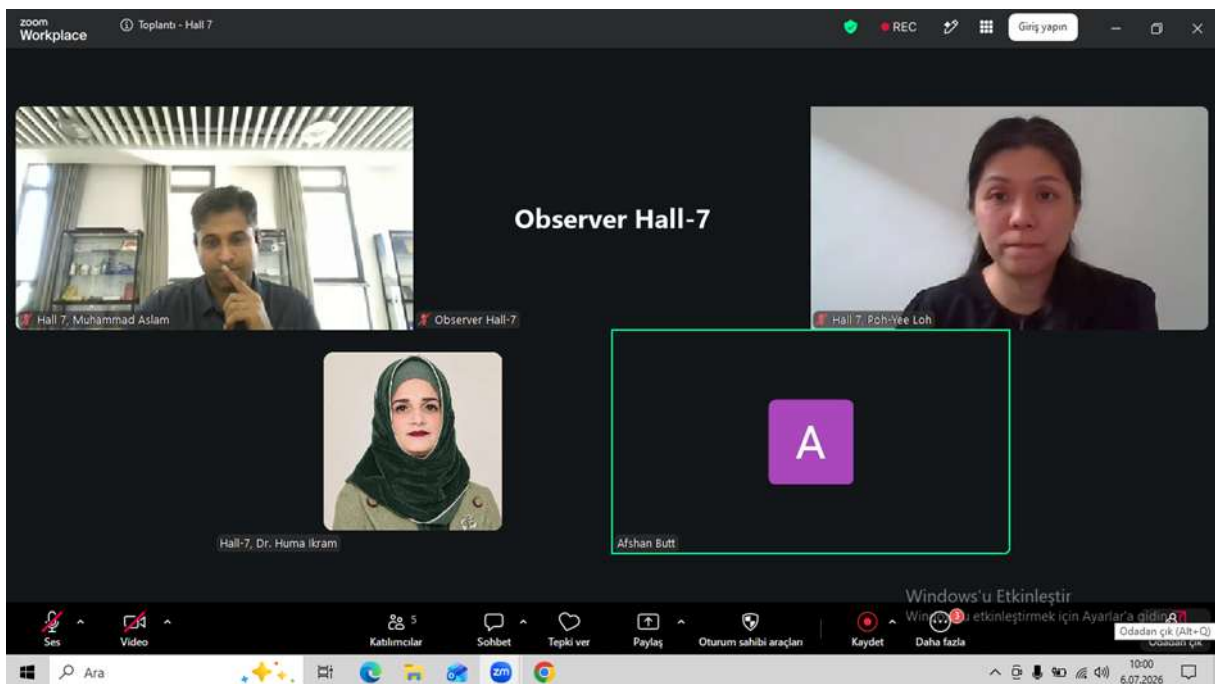
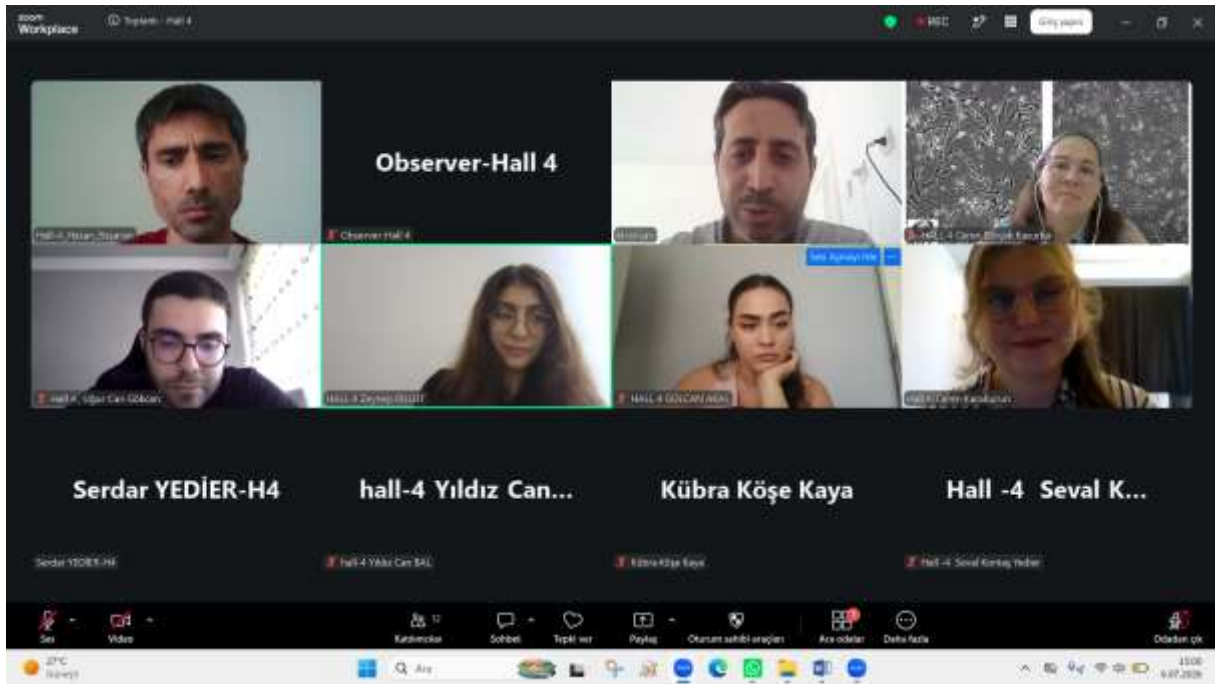
SYMPOSIUM PHOTOS

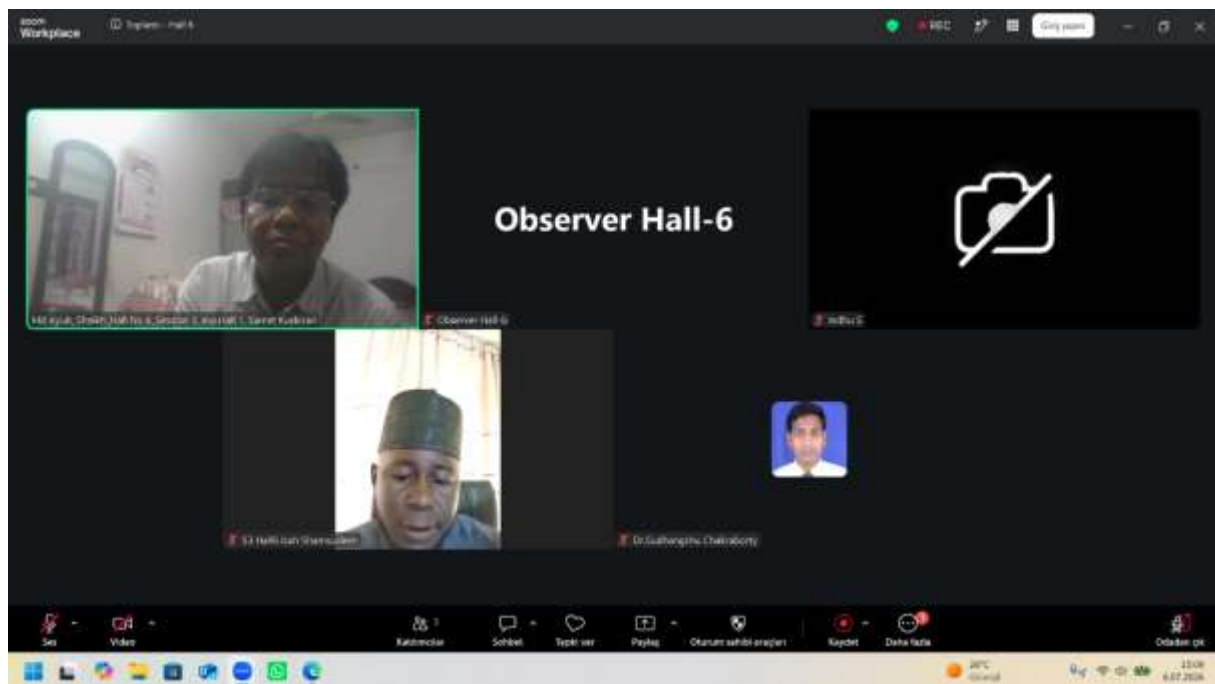


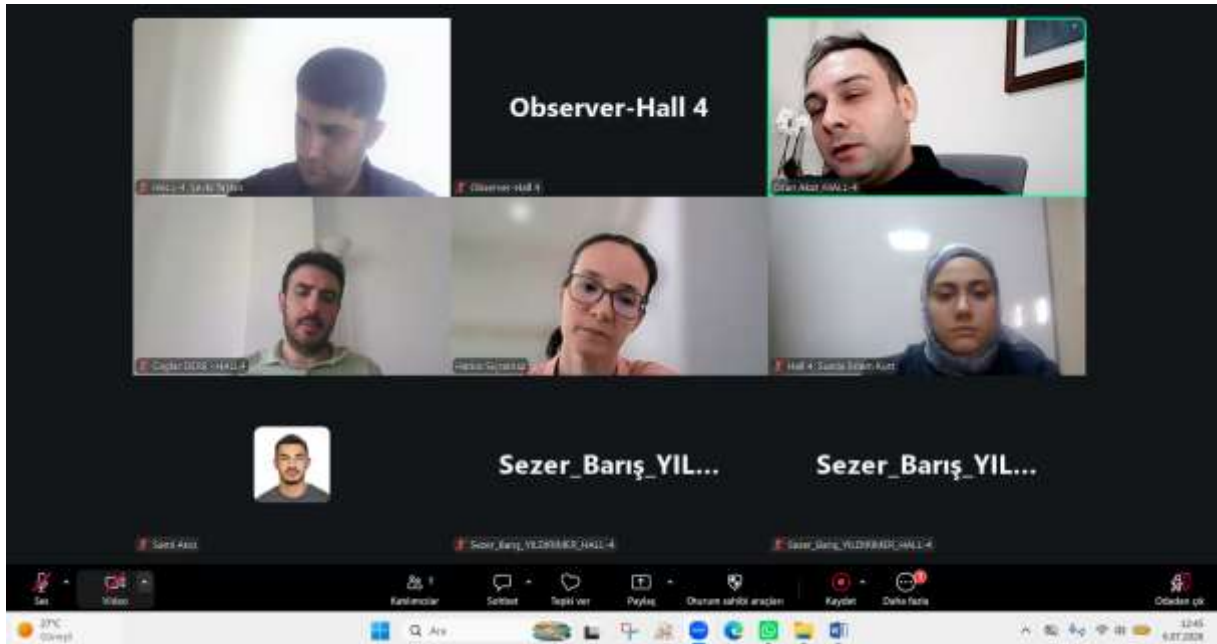
SYMPOSIUM PHOTOS



SYMPOSIUM PHOTOS







CONTENTS

Author	Abstract	Page No
Bükay Yenice Gürsu Mihrinur Yapıcı Kürşat Osman Ay Betül Yılmaz Öztürk Ilknur Dağ	Isolation And Electron Microscopic Characterization Of Extracellular Matrix From Staphylococcus Aureus Biofilm	1
Kağan Tolga Cinisli	Next-Generation Analyses In Regenerative Agriculture: Sap Analysis And Haney Test	3
Ferhat Atik	Algorithmic Opinion Formation: How Platform Architectures Shape Collective Belief Systems	4
Memduh Karalar Gülşah Çufalı	Dynamic Effects Of Arch Shape In Structural Assessment Of Historical Stone Bridges Using Finite Element Method	5
Zeynep Aydın Mine Doğan Yunus Güral	Digital Relationships: A Qualitative Study On The Transformation Of Young People's Perceptions Of Relationships	6
Musa M. Kamara	Sociolinguistic Shift Of Liberia: The Displacement Of Indigenous Languages By Liberian Pidgin English In Monrovia	7
Muhammad Faisal	Algorithmic Fairness In Poverty Targeting Auditing The Bisp Proxy Means Test (Pmt) For Bias	8
El Mostafa Benharaf Ahmed Arif Kaoutar Ouahibi Erradi El Mostafa Ayoub Cherrat Abdellah Zeroual Mohammed El Idrissi	Use Of Quinoxaline To Improve The Efficiency Of Dye-Sensitized Solar Cells	9
Titilayo I. Jesusina Khadijat T. Dauda Enobong R. Essien Violette N. Atasie	Corrosion Inhibition Potential Of Casuarina Equisetifolia Leaf Extract On Mild Steel In Acidic Medium.	10
Md Azizul Islam Saiful Islam Md. Jakir Hossain	Impact Of Over-Usage Of Pesticides In Crops Cultivation On Farmers' Health Conditions: A Sociological Analysis In Bangladesh	11
Major Gheorghe Giurgiu Prof Dr Med Manole Cojocaru	Optimizing Outcomes In Psoriasis: Impact Of Deniplant Nutraceuticals	12
Safinez Boutrid	Acetaminophen-Induced Oxidative Liver Injury In Wistar Rats And Its Attenuation By Vitamin C	13
Samira Boumous Zouhir Boumous Sabrine Morakeb Rayane Yasmine Mahfoudi	Contribution To Lv Voltage Regulation By Storageless Pv Inverters: Limitations Of The Q (U) Characteristic Curve And A Solution Using Transient Capacitive Reactive Power Injection	14
Zouhir Boumous Samira Boumous Rayane Yasmine Mahfoudi Sabrine Morakeb	Physics-Informed Explainable Deep Learning Framework For Early Fault Detection And Prognostics In Dfig-Based Wind Farms	15
Badre Zinaoui Pr.Labjar Najoua Pr.El Hajjaji Souad Elabbari Chaimaa	Integrated Solar Desalination With Thermal Storage And Energy Recovery	17
Isaiah Baba Musa	Heavy Metal Contamination And Pollution Assessment Of Soils Around Gold Mining Sites In Minna And Kataeregi, North-Central Nigeria	18
Valery V. Belakhov	Application Of Heptaene Macrolide Antibiotic Aureofungin In Agriculture As Highly Effective Ecologically Safe Fungicide For Plant Protection	19

Ibrahim Sani Dikko	Biochemistry As The Bedrock Of Life Sciences: Its Role In Health, Agriculture, And Biotechnology	20
Sumayya Akram Matloob Ahmad Sana Aslam	Synthesis And Biological Evaluation Of Pyridylpiperazine-Based Carbodithioates As Urease Inhibitors	21
Huma Ikram Rumaisa Zakir Darakhshan J. Haleem	Responsiveness Of 5ht-1a Receptors In Adult Rats Following Prenatal Stress Induced Susceptibility To Apomorphine Addiction	22
Major Gheorghe Giurgiu Manole Cojocaru	The Gut-Brain-Skin Axis In Acne: Impact Of Polenoderm	23
Afshan Butt Afshan Naseem	Technology Integration In Secondary Stem Classrooms: Examining The Role Of Teacher Demographics	24
Balasubramani G L Rinky Rajput Manish Gupta Pradeep Dahiya Jitendra K Thakur Rakesh Bhatnagar Abhinav Grover	Structure-Based Drug Repurposing To Inhibit The Dna Gyrase Of Mycobacterium Tuberculosis	25
Poh-Yee Loh Payam Shafigh Muhammad Aslam Mohamad Rizal Baharum	Beyond The Phenolphthalein Test: A Critical Comparison Of Concrete Carbonation Assessment Methods	26
Mouad Lazrak Ghita Ait Baddi Maryam Mirouch Ayoub Jamal Dhin Ikram Soukaina Kaoui Chebli Bouchra	Enhancing Olive Pomace Composting Using Natural Biochar: Experimental Evaluation Under Pilot-Scale Conditions	27
Caner Taçoğlu	Risk-Aware Criteria Prioritization For Temporary Warehouse Decisions In Lubricant Oil Supply Chains	28
Duygu Sinanç Terzi	Plant Classification With Dinov3 Under Imbalanced Class Distributions	29
Bekir Sıtkı Şirikçi Zehra Meliha Tengiz Mesut Ongun	Production And Marketing Structure Of Amasya Misket Apple: The Case Of Çamardı District In Niğde Province	31
Ali Baran Dönmez Hatice Siçramaz Ayşen Can	Investigation Of The Effects Of Different Sterilization Methods On The Final Product In Uht Milk Production	33
Sueda Eslem Kurt Fatih Erdem Baştan	Modification Of Silicon Nitride Particle Surfaces Of Different Sizes With A Calcium Phosphate Layer	35
Drini Shehi Edmont Çeliku	One-Stage Laparoscopic Management Of Gallbladder And Common Bile Duct Stones	36
Kristi Trako Iilir Bibolli Jovan Basho	Tenofovir Therapy In Hepatitis B-Related Liver Cirrhosis	37
Tedi Minarolli Birkena Qirjazi	Sinonasal Disease With Orbital Extension	38
Samaneh Mahmood-Aghdam Mina Gholami Alireza Ahmadi Hedieh Rahmati Mehrnaz Izadpanah Abdolreza Daneshvar Amoli	Establishment Of Lymphoblastoid Cell Lines From Spinal Muscular Atrophy (Sma) Patients: A Biobank Resource For Genetic Studies And Therapeutic Development	39
Fatima-Ezzahra Jaayefar Jamila Dahmani	Data Capitalization On Thymus Maroccanus: Phytochemical Composition, Anticandidal Activity, And Synergistic Potential With Conventional Antifungals	41

Fatima-Ezzahra Jaayefar Fatima El Hilah Jamila Dahmani	Data Capitalization On Leontodon Saxatilis: Ecotypic Differentiation And Phenotypic Plasticity As Drivers Of Invasiveness	42
Muhammad Aslam Payam Shafigh Azlan Shah Ali Yilang Liu	An Overview Of The Strength And Durability Properties Of Timber In Marine Environment	43
Frida Zisko	From Model-Centric To Data-Centric Ai:A Systematic Review And Framework For Customer Behavior Prediction In Telecom	44
Tahri Nouhayla Mikou Karima Nabloussi Abdelghani	Screening Ems-Induced Sesame (Sesamum Indicum L.) Mutants For Low-Temperature Tolerance At Germination	45
Emmanuel Tomisin Bello Majekodunmi Rachael Adedayo	Antibacterial Activity Of Dryopteris Fern-Caped Silver Nanoparticles Against S. Aureus And E. Coli	46
Dimitrije Radjenović	Simulation Of Fluid Flow With Free Surfaces Using Lie Advection And Implicit Functions	47
Monika Lopuszanska-Dawid Paweł Tomaszewski Katarzyna Milde Patrycja Wiślak Janusz Dobosz Bartosz Molik	Parents' Bmi Vs. Child's Bmi:Results Of The Polish National Project „Physical Education With University Of Physical Education” (Pe With Upe)	48
Dudunur Ertargin Fehmi Kozveren Emrah Koç Beyhan Akın Fatma Aykut Tonk	Farklı Tane Rengine Sahip Ekmeklik Buğday (<i>Triticum aestivum</i> L.) Genotiplerinde Bayrak Yaprak Alaninin Değerlendirilmesi	49
Marija Radmilović-Radjenović Branislav Radjenović Darko Vasiljević Bojana Bokić Branko Kolarić	Geometry-Driven Thermodynamics In Nanostructured Materials	50
Md. Mahamudur Rahman Papon	Understanding The Relationship Between Structural Damage And Soil Liquefaction In Urban Areas By Analyzing The Characteristics Of Ground Motion	51
Ngueya Essallami Ahmed Khouya M'barka El Mouedden Mohamed Daoudi	Governance And Strategic Planning Of Renewable-Powered Desalination Systems: Implications For Public Water Management	52
Fatima Mustapha Bindawa Abubakar Sani	A Literature Review On Bauhinia Rufescence Leaves Used For Anti-Malarial Activity	53
M.K.Vijayalakshmi S.Rubin Thara N.Arshad Ahamed E.Praveena R.Swathi	Neuropharmacology Of Brain–Computer Interfaces: Emerging Therapeutic Strategies And Future Perspectives	54
V Keerthana Ameerah Avinash R Saravanan	Skin Toxicities Of Targeted Therapies In Oncology: A Review Of Clinical Presentation And Management	55
Iram Liaqat	Flagellar Motility Controls Biofilm Formation By Bacillus Cereus And Yersinia Enterocolitica	56
Yetunde Kemi Timothy	Integrating Artificial Intelligence And Robotics Into Resources-Limited Healthcare System	57
Fatima El Hilah Nadia Belabbib Jamila Dahmani Lalla Aicha Lrhorfi	Medicinal Plants From The Mediterranean And North Africa : Natural Alternatives Against Antimicrobial Resistance	58

Davies- Folorunso Tesleemah.O. Folorunso Jamiu.B. Adekola, Saheed.A Muhibi, Musa.A. AbduljamiH-Folorunso, Maryam.T. AbduljamiH-Folorunso, Zainab.T.	Advocacy For Voluntary Non Remunerated Blood Donors As The Safest Source Of Blood Transfusion In Nigeria : A Review	59
Eyyup Gerçekcioğlu Mehmet Albaşkara Gökhan Çolak	Effects Of Surface Roughness And Lubricant Viscosity On The Hydrodynamic Lubrication Performance Of Radial Journal Bearings	61
Sibel Demir Hakkı Osman Necipoğlu Ömür Alkan	Effect Of Pre-Braiding Process Chemical Coating Application On The Friction Performance Of Braided Uhmwpe Crane Ropes	63
Yaren Emine Keskin Karakuş Zerrin Pat	Investigation Of Removal Conditions For Reactive Orange 16 Dye From Textile Wastewater Using Activated Carbon Derived From Nacl-Activated Eriobotrya Japonica (Loquat) Biomass	65
Abdullah Salem Vural Emir Kafadar Eser Olğar	Acoustic And Mechanical Properties Of Sukkari Date Seed Powder-Reinforced Polyester Biocomposites	67
Uğur Can Gökcan Ayhan Oral	Preparation Of A Nanofibrous Material For Glucose Detection	68
Zeynep Bulut Gülcan Akal Seval Kontaş Yedier Ceren Börçek Kasurka Nihan Küçük Yılmaz Zülal Atlı Şekeroğlu	The Effects Of Hemp Seed Extract On Toxicity And Apoptosis In Triple-Negative Breast Cancer Cells (Mda-Mb 231)	69
Gülcan Akal Zeynep Bulut Seval Kontaş Yedier Ceren Börçek Kasurka Nihan Küçük Yılmaz Vedat Şekeroğlu	The Effects Of Aronia Extract On Toxicity And Oxidative Stress In Triple-Negative Breast Cancer Cells (Mda-Mb 231)	72
Kübra Köşe Kaya	Microwave-Assisted Interfacial Engineering Of Photocatalysts: Heterojunction Construction, Carbonaceous Supports, And Charge-Transfer Pathways	75
Murat Kıranşan	Sustainable Photocatalytic Treatment Of Disperse Blue 56 Contaminated Wastewater Using Cao Nanoparticles: Performance Optimization, Kinetic Evaluation And Mechanistic Insights	77
K. P. Thevikka N. Manjula Perachi Devi S. Rubin Thara	Pharmacogenomics And Precision	78
Ethirajan Barani G Priya S Indhu Murugesan Kamaraj	Crispr/Cas9-Mediated Pd-1 Gene Knockout In Jurkat T Cells Enhances Anti-Tumor Immune Response Against Triple- Negative Breast Cancer Cells	79
S Indhu G Priya Ethirajan Barani Murugesan Kamaraj	Plant, Microbe And Insect Interactions From The Chemical Perspective: Approaching Through Endophytes, Allelochemicals, Soil Microbes And Their Metabolites For Sustainable Resistance Against Pests	80
Undang Yogi Nirwanto Ristina Siti Sundari Kania Nanda Oktaviani Rizky Adi Nugraha Tarigan	Sustainable Fertilization: Synergy Of Tofu Waste Lof And Npk On Cucumber Growth, Yield, And Agribusiness Benefit	81
Parisa Zafari	Relationship Between Vitamin D Plasma Level And Foxp3 Gene Expression Among Rheumatoid Arthritis Patients	82

Parisa Zafari	The Association Between The Plasma Sugar And Lipid Profile With The Gene Expression Of The Regulatory Protein Of Mtor (Raptor) In Patients With Rheumatoid Arthritis	83
Ilham Chennak Soufiane Tahiri Mohammed El Krati Samah Ait Benichou	Humic Substances Derived From Municipal Solid Waste Compost As Natural Biostimulants For Tomato And Alfalfa Seed Germination	84
Hasanov Elgun Kamil Tamrazli Tamkin Tamraz Alizade Rufana Asif Gasimov Vugar Jafar Abbasova Khayala Adil	Experimental Investigation Of Oil-Collecting Capacity Of Ni And Co-Containing Surface-Active Compositions Synthesized On The Basis Of Technical Petroleum Acids In Oil–Water Systems	85
Samir Badiyev Samad Safarov	Application Of Pso-Optimized Pid Controller To Non-Linear Dynamic Systems	86
Mohamed El Morsy Laila Afia	Strategies For Emission Reduction In Industrial Steam Generation Systems	87
Manar Souhair Samira Zaoui Malek Shahwan	Fostering Learner Autonomy In Tafl: Cognitive Mapping And Interactive Modalities In The Bareq Platform	88
K. Vignesh	Thermal Imaging To Detect Pathogen-Induced Stress	89
Adekola Saheed A. Yahaya Gobir Kola Musah Khadijat Toyin Olaniyan Mathew Folaranmi Oparinde Dolapo Pius	Vitamin D, Calcium, And Prostate Cancer Among African Men: A Review	90
Djenaoui Abdelatif Reffad Hamza Alti Adel	Hierarchical Blockchain-Based Security Framework For On-Demand Iot Services In Cloud-Assisted Healthcare	91
Lovleen Gupta Santosh Kumar	Energy Market Volatility, Fossil Fuel Dependence, And Stock Market Crash Risk	92
Amit Kumar Singh Lovleen Gupta Mamta Dhanda	From Public Finance To Corporate Finance: Influence Of Green Municipal Bonds (Gmb) Issuance On The Financial Structure Of Indian Municipal Corporations	93
Ghazaleh Elahi Mehrddad Gholami	Antimicrobial Resistance, Virulence Gene Profiling, And Genetic Diversity Of Multidrug-Resistant Pseudomonas Aeruginosa Isolates In Mazandaran, Iran	94
Ghazaleh Elahi Abdollah Ardebili	Antimicrobial Photodynamic Effect Of The Photosensitizer Riboflavin, Alone And In Combination With Colistin, Against Pandrug-Resistant Pseudomonas Aeruginosa Clinical Isolates	95
R. Devadharshini Meenatchi.S Gomathy E W.Helen	Cervical Cancer Prevention And Hpv Vaccination	96
Amit Kumar Singh Mukesh Kumar	Algorithmic Financial Literacy: A Conceptual Framework For Integrating Ai Into Personal Financial Planning	97
Atikah Suwanda, S.Si. Hardoko Insan Qudus, M.S. Sutopo Hadi	Electrophilicity As A Predictor Of Bioactivity: Chemical Reactivity Study Of Organotin(Iv) 4-Nitrobenzoate Compounds Using Cyclic Voltammetry	98
Ivanka Hadžić Ivan Pavlović	Importance Of Hoof Health In Cattle Milk Production	99
Grigorina Boce	Cybersecurity In Intelligent Public Transport Systems In Albania: Challenges, Risks, And A Secure Its Framework	100

Author	FULL TEXT	Page No
Mihrinur Yapıcı Bükay Yenice Gürsu Kürşat Osman Ay Betül Yılmaz Öztürk Ilknur Dağ	Detailed Dynamic Characterization Of Candida Parapsilosis Biofilm Formation And Development Using Surface Enhanced Raman Spectroscopy (Sers)	101
Badegül Tunçay	Investigation Of The Effect Of Mechanical Milling Time On The Powder Particle Morphology Of Aa7075 Aluminum Alloy	110
Songül Gürsoy Dilek Şentürk Demirel	Recent Advances In Animal Feed Processing Techniques And Equipment	115
Belgin Coşge Şenkal	Safflower (Carthamus Tinctorius L.) Cultivation And Multipurpose Use Potential	121
Belgin Coşge Şenkal	Evaluation Of The Relationships Between Seed Yield And Yield Components In Safflower (Carthamus Tinctorius L.) Grown Under Rainfed (Non-Irrigated) Conditions Using Multivariate Analysis Methods)	129
Bahar Kuloğlu	The Q-Analogue Of The Terraced Rhaly Matrix	138
Aysen Koç Zeliha Özkan	The Effect Of Different Iba Doses And Bacterial Application On The Rooting Of Chokeberry Wood Cuttings	145
Aysen Koç Sebahat Yeter	The Effect Of Different Iba Doses And Bacterial Application On The Rooting Of Black Mulberry Wood Cuttings	153
Emine Sema Çetin Öznur Yetişir Berna Keles	The Effect Of Silicone Nanoparticle Application On Secondary Metabolite Production In Michele Palieri Grape Variety	163
Emine Sema Çetin Orhan Yılmaz Berna Keles	Investigation Of The Effects Of Kaolin Applications On Grape Berry Composition In Grapevines	174
Hatice Bekci	Research On The Biological Activities Of Humulus Lupulus Plant	184
Ebru Yabaş	A Facile And Efficient Synthetic Strategy For Phthalocyanines: Synthesis, Optical Properties, And Structure–Property Relationships	188
Ebru Yabaş	Carbon-Based Phthalocyanine Hybrids: Multifunctional Materials For Future Defense Technologies	197
Zehra Meliha Tengiz Bekir Ayyıldız Merve Ayyıldız	The Role Of Pesticide Dealers In The Agricultural Input Supply Chain And Producer Preferences: The Case Of Kırıkkale Province	203
Didem Altun Kenan Altun	Adaptive Control Of Induction Heating Systems	212
Didem Altun Kenan Altun	Comparison Of Series–Parallel Resonant Circuits In Induction Heating Systems	219
Güliz Türkmenoğlu	Ethnobotanical Characteristics Of Some Plant Taxa In The Adana (Türkiye) Region	227
Güliz Türkmenoğlu	Ethnobotanical Characteristics Of Some Plant Taxa In The Manisa (Türkiye) Region	235
Tuğba Şanlı Betül Kafkashoğlu Yıldız Elif Işık Yahya Kemal Tür	The Effect Of Sm2O3 And ZrO2 Additives On The Ballistic Performance Of Al2O3 -Based Ceramics	242
Şeyma Yalçinkaya Ramiz Gültekin Akay Çiğdem Karadağ	Synthesis And Characterization Of Microwave-Assisted Ptco/Graphene Core–Shell Catalysts For Proton Exchange Membrane Fuel Cells	253
Hale Günaçtı	Rhizoctonia Root And Crown Rot Of Sugar Beet In Sivas	258
Hale Günaçtı	Cercospora Leaf Spot Disease In Sugar Beet: A Global Perspective	265
Ömer Sözen Yeter Çilesiz Tolga Karaköy	Development Of Climate Change-Resilient/Tolerant Chickpea Genotypes	271

Yeter Çilesiz Ömer Sözen Tolga Karaköy	Development Of Climate Change-Resilient/Tolerant Soybean Genotypes	291
Tolga Karaköy Yeter Çilesiz Ömer Sözen	Revealing The Relationships Among Yield Components In Some Soybean Genotypes Through Correlation Analysis	309
Ömer Sözen Tolga Karaköy	Revealing The Relationships Among Yield Components In Some Soybean Genotypes Through Path Analysis	317
Emrah Aksu Kamil Aykutanp Gündüz Fatih Başçiftçi	Network Security, Firewalls, Intrusion Detection And Prevention Systems (Ai-Powered Studies)	326
Emrah Aksu Fatih Başçiftçi	Philosophical, Pedagogical, And Hardware Synthesis Of Virtual Reality Technologies: A Computer Engineering Perspective	343
Mohammed Mesnoui Ourida Benouamane Chawqi Benchikh Messaoud Roumani Tarek Ot-Man Ouahiba Mizab Reguia Zeguerrou Mohammed Bouzouina	Optimization Of Slow Pyrolysis Conditions For Producing High-Quality Biochar From Date Palm Residues	358
Nodar Sulashvili Margarita Beglaryan Maka Buleishvili Magda Davitashvili Nodar Mitagvaria Vira Kravchenko Marika Sulashvili Nato Alavidze Nino Abuladze Igor Seniuk Nana Gorgaslidze David Aphkhazava	Scientific Perspectives From Engineering & Natural Sciences On The Synergy Between Environmental Engineering And Eco-Urbanism: Enabling Adaptive, Low-Carbon, Resilient, Sustainable, And Climate- Responsive Urban Systems	365
Ali Ihsan Çelik Ismail Ünsal Mehmet Fatih Şahan	Elevated Service Temperature Effects On Impact Behavior Of Rap-Substituted Geopolymer Concrete	411
Neslihan Beyazıt Azra Kıyak	In Silico Investigation Of The Inhibitory Activities Of Benzofuran-Based Heterocyclic Hybrid Compounds Against Cholinesterase Enzymes Involved In Alzheimer’s Disease	417
Ege Öztetik Sami Atici Hakan Arslan	Investigation Of Dynamic Behaviors And Forced Vibration Characteristics Of Vibratory Bowl Feeders	426
Caglar Dere	Integration Of Dual Fuel Marine Engines And Fuel Cell For Maritime Decarbonisation	435
Ozan Akat Muhlis Sezgin Selime Ölmez Bayhan Erol Bayhan	A Regional Assessment Of Plant Protection Product Use Trends In The Gap Region, Türkiye (2016–2024)	442
Muhlis Sezgin Ozan Akat Merve Akyildiz Selime Ölmez Bayhan Erol Bayhan	Toxic Effects Of Some Pesticides On The Eggs Of Nabiss Pseudoferus Orientarius Remane, 1962 (Hemiptera: Nabidae)	453
Sezer Barış Yıldırım Ahmet Feyzioğlu Hüseyin Haliloğlu	Ahp-Based Evaluation Of The Industrial Symbiosis-Oriented Environmental Sustainability Performance Of Different Fdm Designs Generated By The Generative Design Method	459
Şevki Taşkın	Experimental Investigation Of Fresh And Hardened Concrete Properties With Different Cement Types And Assessment Of Carbon Emissions	470
Benyahia Amar Benyahia Abdessetar	Mechanical And Physical Performance Of Eco-Friendly Mortars Enhanced With Waste Tire Rubber And Redispersible Polymer Powders	475

Bashiru Muhammad Liman	Challenges Of Organizing Guidance And Counselling Programmes In Some Selected Tertiary Institutions In Sokoto State: Need For Casson Interventions	483
David Yusuf Hassan	Combine Efficacy Of Aqueous Mango And Neem Leaves Extract Against <i>S. Aureus</i>	492
Ipek Balnan	Recent Advances In Neuromorphic Photodetectors For Artificial Vision And In-Sensor Computing	510
Ipek Balnan	Mos ₂ -Based Neuromorphic Photodetectors: Mechanisms And Applications	522
Ayşenur Demir Elvan Ender Altay	A Landscape Design Proposal For Connectivity And Public Space Integration In Coastal Areas: The Tirilye Case Study	532
Ceren Karaburun Elvan Ender Altay	Landscape Design Parameters For Enhancing Social Interaction In Public Open Space	545
Hasan Üstün Başaran Aytekin Duranay	An Overview Of The Applications Of Current Wind-Assisted Propulsion Technology In Modern, Energy-Efficient Ships	558
Kübra Köşe Kaya	Microwave-Assisted Photocatalyst Design: Crystal-Phase Control, Defect Engineering, And Morphological Regulation For Enhanced Photocatalytic Performance	566
Yusuf Ahmed Tijjani Isyaku Idris	Do Governance And Policy Commitment Enhance Sustainable Wash Outcomes? The Moderating Role Of Funding Effectiveness In Katsina State's Surwash Programme	583
Isah Shamsudeen Idris Fatima Safirat Madaki	Impact Of Electricity Supply Instabilty On The Financial Performance Of Small And Medium Enterprises (Smes) In Niger State, Nigeria	597
Md Ayub Sheikh Sudhangshu Chakraborty	Complex Impedance And Dielectric Relaxation Behavior Of Sodium Silicate (Na ₂ SiO ₃) Under Thermal Activation	604
Dovletova Shirinjemal Melebayeva Oguljennet	Development Of A Natural Bioindicator From Pomegranate Peels For Sustainable Ph Detection	612
Dovletova Shirinjemal Yuldashov Bahadır	Sustainable Fabrication Of A Natural Polymer-Based Bioplastic Using Agar, Gelatin, And Glycerin: A Low-Cost Approach To Eco-Friendly Material Design	617
Mehmet Fatih Yılmaz Mahmut Kaplan Abdullah Yasin Dalkılıç	Some Botanical Characteristics Associated with Herbage Yield of Fenugreek (<i>Trigonella foenum-graecum</i> L.) Genotypes Collected from Kahramanmaraş Natural Flora	623

ABSTRACT

**ISOLATION AND ELECTRON MICROSCOPIC CHARACTERIZATION OF
EXTRACELLULAR MATRIX FROM *Staphylococcus aureus* BIOFILM**

Doç. Dr. Bükay YENİCE GÜRSU (ORCID: 0000-0002-6822-3484)

Central Research Laboratory Application and Research Center, Eskisehir Osmangazi University,
Eskisehir, Turkey

Email: bgursu@ogu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6822-3484>

Mihrinur YAPICI (ORCID: 0000-0003-2690-2769)

Institute of Science, Biotechnology and Biosafety the Department Eskisehir Osmangazi University,
Eskisehir, Turkey

Email: mihrinuryapici@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2690-2769>

Dr. Kürşad Osman AY (ORCID: 0000-0002-3133-1908)

Central Research Laboratory Application and Research Center, Eskisehir Osmangazi University,
Eskisehir, Turkey

Email: koay@ogu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3133-1908>

Doç. Dr. Betül YILMAZ ÖZTÜRK (ORCID: 0000-0002-1817-8240)

Central Research Laboratory Application and Research Center, Eskisehir Osmangazi University,
Eskisehir, Turkey

Email: byozturk@ogu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

Prof. Dr. İlknur DAĞ (ORCID: 0000-0002-7352-8653)

Vocational Health Services High School, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey

Email: ildag@ogu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7352-8653>

Özet

Biyofilmler, mikroorganizmaların yüzeylere tutunması ve ardından ekstraselüler matriks (ECM) üretmesiyle oluşan, yüzeye bağlı mikrobiyal topluluklardır. ECM, biyofilme yapısal destek sağlar, hücreler arası iletişimi destekler ve gen transferini kolaylaştırır. Biyofilm direncinde oldukça etkili olan ECM yapısı; antibiyotiklere, dezenfektanlara ve bağışıklık sistemi hücrelerine karşı koruyucu bir bariyer görevi görür. Bununla birlikte, ECM'nin yapısı ve bileşimi oldukça karmaşık ve değişkendir; ayrıca halen tam olarak anlaşılamamıştır. *Staphylococcus aureus*, özellikle yara, implant ve kateter ilişkili enfeksiyonlarda biyofilm oluşturabilen bakteriyel bir türdür ve ECM yapısı bu enfeksiyonların şiddetlenmesine katkı sağlar. Bu çalışmada, *S. aureus* biyofilminden ECM izolasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen matriks yapısı elektron mikroskopik teknikler kullanılarak analiz edilmiştir. Transmisyon elektron mikroskopisi (TEM) verileri, ECM'nin amorf ve karmaşık ağ benzeri bir yapıya sahip olduğunu desteklemiştir. Bileşenlerin kontrast farklılıklarına bağlı olarak, karbonhidrat baskın bölgeler daha açık renkte ve daha fibriller yapıda görülürken; protein veya eDNA olduğu düşünülen bölgeler siyah renkte ve kümelenmiş yapılar halinde gözlenmiştir. Taramalı elektron mikroskopisi (SEM) verileri de ECM'nin yer yer fibröz veya gözenekli yapı gösteren amorf kitlelerden oluştuğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Staphylococcus aureus*, biyofilm, ekstraselüler matriks, elektron mikroskopisi

Teşekkür: Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2025-3456 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Abstract

Biofilms are surface-associated microbial communities formed by the adhesion of microorganisms to surfaces and subsequent production of extracellular matrix (ECM). ECM provides structural support to the biofilm, supports intercellular communication, and facilitates gene transfer. Highly effective in biofilm resistance, the ECM structure acts as a protective barrier against antibiotics, disinfectants, and immune system cells. However, the structure and composition of ECM are quite complex and variable and are still not fully understood. *Staphylococcus aureus* is a bacterial species that forms biofilms, particularly in wound, implant, and catheter-related infections, and the ECM structure exacerbates these infections. In this study, ECM isolation was performed from *S. aureus* biofilm, and the resulting matrix structure was analyzed using electron microscopic techniques. Transmission electron microscopy (TEM) data support the amorphous and complex network structure of the ECM. Due to differences in the contrast of the components, carbohydrate-dominant regions appeared lighter in color and more fibrillar in structure, while regions thought to be protein or eDNA were observed as black and in clusters. Scanning electron microscopy (SEM) data also revealed that the ECM consisted of amorphous masses with a fibrous or porous structure in places. Detailed analysis of the ECM could provide important clues for developing effective antibiofilm strategies.

Keywords: *Staphylococcus aureus*, biofilm, extracellular matrix, electron microscope

Acknowledgments: This work was supported by Eskişehir Osmangazi University Scientific Research Projects Coordination Unit under grant number FDK-2025-3456.

**NEXT-GENERATION ANALYSES IN REGENERATIVE AGRICULTURE: SAP ANALYSIS
AND HANEY TEST**

Kağan Tolga CİNİSLİ

Institute of Pharmaceuticals, Vaccines and Biotechnology Ataturk University, Erzurum, Türkiye
Coordination Office of Computer-Based Modeling and Simulation of Biological Systems, Ataturk
University, Erzurum, Türkiye

Azizeh SHADIDIZAJI

Department of Agriculture Biotechnology, Faculty of Agriculture, Ataturk University, Erzurum, Turkey

Abstract

Rejeneratif tarımın toprak sağlığını ve ekosistem bütünlüğünü iyileştirme hedefi, geleneksel toprak ve yaprak analizlerinin ötesine geçen yeni nesil tanı araçlarını zorunlu kılmakta olup, bu alanda öne çıkan iki yöntem bitki özsü analizi (sap analizi) ve Haney Toprak Sağlığı Testi'dir. Bitki özsü analizi, yaprak dokusu testlerinden farklı olarak bitkinin iletim demetlerindeki taze özsuyu ölçerek besin eksikliklerini geleneksel yöntemlere kıyasla 2-3 hafta, görsel semptomlardan ise 5-6 hafta öncesinden tespit edebilme kapasitesine sahiptir. Özsü analizinde eski ve yeni yaprakların ayrı ayrı test edildiği diferansiyel teknik, bitkinin mobil ve immobil besinleri ne kadar etkin kullandığını net şekilde gösterir; rejeneratif sistemlerde yetiştirme sezonu boyunca yaklaşık 14 günde bir yapılan bu örneklemeler, çiftçilere gübreleme stratejilerini anlık olarak revize etme, gereksiz girdileri minimuma indirme ve verim kaybı yaşamadan rejeneratif uygulamalara geçiş yapma olanağı tanır. Öte yandan, ABD'li USDA bilim insanı Rick Haney tarafından geliştirilen Haney Testi, toprak biyolojisi, kimyası ve organik maddesi arasındaki dinamik ilişkileri bütüncül şekilde değerlendirir; bitki kök salgılarını taklit eden organik asit ekstraktları (H3A) kullanarak besinlerin doğal yollarla nasıl bitkiye sunulabileceğini simüle eder ve kimyasal ayrıştırıcılar yerine doğaya dost çözücüler kullanmasıyla da öne çıkar. Bu testin ölçtüğü Solvita CO₂ solunumu, suda çözünür organik karbon ve azot (toplam organik karbon bir evin büyüklüğüyken, bu değer o evin buzdolabına yani mikroorganizmaları anlık besleyen gerçek gıdaya benzetilir), karbon-azot oranı ve 0-50 aralığındaki Haney Toprak Sağlığı Skoru, çiftçilerin sentetik gübre kullanımını azaltmasına, örtü bitkisi seçimlerini optimize etmesine ve toprak sağlığındaki yıllık ilerlemeyi somut sayılarla takip etmesine yardımcı olur. Sonuç olarak, bitki özsü analizi mikro ölçekte bitkinin anlık beslenme ihtiyaçlarına müdahale imkânı sunarken Haney Testi makro ölçekte toprak ekosisteminin uzun vadeli sağlığını haritalandırmakta; bu iki yöntem birlikte kullanıldığında rejeneratif tarımın "gözlemle, yorumla, uyarla ve tekrar gözlemle" şeklindeki döngüsel felsefesini güçlü verilerle destekleyerek hem ekolojik dayanıklılığı hem de ekonomik sürdürülebilirliği mümkün kılmaktadır.

**ALGORITHMIC OPINION FORMATION: HOW PLATFORM ARCHITECTURES SHAPE
COLLECTIVE BELIEF SYSTEMS**

Dr. Ferhat Atik

Girne American University, Communication Faculty, Communication And Media Management

E-mail: ferhatatik@me.com

ORCID: 0009-0008-9089-9051

Abstract

Public opinion formation increasingly unfolds within algorithmically structured communication environments. This paper investigates how platform architectures influence the emergence and stabilization of collective belief systems. Integrating perspectives from public opinion theory, computational communication, and platform studies, the research conceptualizes opinion formation as a dynamic interaction between human cognition and algorithmic mediation. Using a mixed analytical framework combining discourse analysis and large-scale interaction mapping, the study reveals how recommendation systems and engagement metrics guide the circulation of persuasive narratives. These mechanisms produce feedback loops that intensify belief clustering and reshape the boundaries of deliberative publics. The findings suggest that algorithmic infrastructures function as active participants in opinion construction rather than neutral conduits of information. By advancing a systemic model of algorithmic opinion formation, the paper contributes to methodological and theoretical discussions in public opinion research and highlights the implications for democratic deliberation in digitally mediated societies.

Keywords: public opinion, algorithms, belief formation, platform architecture, digital deliberation

**DYNAMIC EFFECTS OF ARCH SHAPE IN STRUCTURAL ASSESSMENT OF HISTORICAL
STONE BRIDGES USING FINITE ELEMENT METHOD**

Memduh KARALAR

Associate Professor, Zonguldak Bulent Ecevit University, Department of Civil Engineering, Zonguldak,
TURKEY

E-mail: memduhkaralar@beun.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-4595-8971

Gülşah ÇUFALI

Graduate Researcher, Zonguldak Bulent Ecevit University, Department of Civil Engineering, Zonguldak,
TURKEY

E-mail: gulsahcufali@gmail.com

Özet

Bu çalışmada, köprü üzerindeki kemer formunun kalınlık ve yükseklik değişiminin etkisi sayısal analiz olarak incelenmiştir. Bu amaçla, Ege Bölgesi'ndeki Afyonkarahisar'ın İscehisar ilçesinde bulunan tarihi Antik İscehisar Köprüsü sayısal uygulama olarak seçilmiştir. Köprü, statik analiz olarak kendi ağırlığına ve hareketli yüke maruz bırakılmıştır. Dinamik analiz için, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nden (PEER) elde edilen tarihi nitelikteki 10 farklı fay hareketinin köprü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Uygulanan analizlerden kaynaklanan ana gerilme ve deformasyon alanları belirlenmiştir. Köprüye uygulanan analiz sonuçlarına dayanarak karşılaştırmalı olarak kontur diyagramları, tablolar ve grafikler verilmiştir. Analizin sonunda, köprüde kendi ağırlığı altında kemer kalınlığı arttıkça yer değiştirmelerin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, hareketli yükler ve depremlerin etkisi altında, kemer kalınlığı arttıkça yer değiştirmelerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada belirtilen performans kriterleri kullanılarak sismik güvenilirlik değerlendirmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: taş kemer köprü; dinamik etkiler; fay mesafeleri; sonlu elemanlar yöntemi (FEM); kemer şeklinin etkisi

Abstract

In this study, the effect of the variation of the arch form in thickness and height on the bridge was investigated as a numerical analysis. For this purpose, the historic Antik Iscehisar Bridge located in the Iscehisar district of Afyonkarahisar in the Aegean Region was elected as a numerical application. The bridge was subjected to its own weight and moving load as a static analysis. For dynamic analysis, the effect of 10 different fault movements with historical character obtained from The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) on the bridge was investigated. The areas of principal stress and deformation resulting from the applied analyses were determined. Contour diagrams, tables, and charts were given in a comparative manner based on the results of the analysis applied to the bridge. At the end of the analysis, it was observed that the displacements decreased as the arch thickness increased under its own weight in the bridge. In addition, under the influence of live loads and earthquakes, it was observed that the displacements decrease as the arch thickness increases. A seismic reliability assessment was made using the performance criteria provided in this study. If the security level is below what it should be, reinforcement applications can be designed. Accordingly, future maintenance and monitoring planning can be made.

Keywords: masonry arch bridge; dynamic effects; fault distances; FEM; arch shape influence

**DIGITAL RELATIONSHIPS: A QUALITATIVE STUDY ON THE TRANSFORMATION OF
YOUNG PEOPLE'S PERCEPTIONS OF RELATIONSHIPS**

Undergraduate Student Zeynep AYDIN

Fırat University, Department of Statistics, Elazığ-Turkey
E-mail: aydinzeynep352@gmail.com

Research Assistant Dr. Mine DOĞAN

Fırat University, Department of Statistics, Elazığ-Turkey
E-mail: mine.dogan@firat.edu.tr
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2745-9909>

Assist. Prof. Dr. Yunus GÜRAL

Fırat University, Department of Statistics, Elazığ-Turkey
E-mail: ygural@firat.edu.tr
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0572-453X>

Abstract

The integration of digital technologies into daily life has led to significant changes in individuals' communication styles and social relationships. Young people, in particular, experience the processes of forming, maintaining, and ending relationships differently than previous generations through social media platforms and digital communication tools. This situation is causing a reshaping of the meanings, expectations, and dynamics associated with romantic relationships. The aim of this research is to examine, from a qualitative perspective, the changing relationship perceptions of young people during the digitalization process and the impact of digital environments on romantic relationships. The research was conducted within the framework of a qualitative research approach. The study group consisted of 14 students studying at Fırat University who participated in the research on a voluntary basis. Data from the participants were collected through an interview form consisting of open-ended questions. Participant responses were coded using the MAXQDA qualitative data analysis program and analyzed using thematic analysis method. In the analysis of the collected data, participants' experiences with digital communication tools, relationship expectations, and how they interpret relationships formed in the digital environment were examined. The analysis revealed that the findings were grouped under three main themes: challenges, advantages, and emotional impacts. The findings indicate that digitalization facilitates the relationship-building process for young people, increases the frequency of communication, and offers new opportunities for acquaintance. However, it was also observed that digital environments create new areas of discussion regarding fundamental relationship elements such as trust, privacy, intimacy, and commitment. Furthermore, it was determined that young people perceive digital relationships as more accessible but also more fragile, artificial, and temporary compared to face-to-face relationships. In conclusion, the study reveals that digitalization is transforming traditional perceptions of romantic relationships and reshaping young people's relationship experiences. It is believed that this research will contribute to the literature in the fields of youth studies, digital sociology, and communication.

Keywords: Digital relationships, romantic relationships, social media, youth, qualitative research.

**SOCIOLINGUISTIC SHIFT OF LIBERIA: THE DISPLACEMENT OF INDIGENOUS
LANGUAGES BY LIBERIAN PIDGIN ENGLISH IN MONROVIA**

Musa M. Kamara

Oriental Studies–African Studies, Warsaw, Poland
m.kamara@student.uw.edu.pl

ABSTRACT

The study of Liberian Pidgin English has been neglected largely in the mainstream analysis of West African Pidgin English varieties. While numerous research studies continue to be conducted on other African countries, including Nigerian, Ghanaian, Gambia and Cameroun Pidgin English, the scope of studies on Liberian Pidgin English are not only outdated, but also generally limited to Hancock, (1974) and Singler, (1981)'s foundational works, which lacked comprehensive fieldwork appropriate for addressing current realities in Liberia linguistics shift. This research investigates the extent to which Liberia Pidgin English has rapidly grown as the primary medium of everyday communication in urban spaces after civil war ended in 2003 while the country experience declined in indigenous languages speakers. The research examines factors leading to the domination of Liberian Pidgin English in Monrovia and its impact on indigenous languages in Liberia by focusing on cultural context, social meanings, and most importantly, live experiences behind such language shift. The study will utilize qualitative research methods. Data were collected through semi-structure interviews with open-ended questions, and ethnographic observations of social groups conversations in places such as markets, schools, religious, and public institutions. Thematic analysis were applied to identify themes and patterns via interview transcript and field notes, ensuring that meanings are constructed from the field observations and participants' perspective on indigenous languages and Liberian Pidgin English.

Key words: Sociolinguistic, Culture, Identity, Liberia, Language.

**ALGORITHMIC FAIRNESS IN POVERTY TARGETING AUDITING THE BISP PROXY
MEANS TEST (PMT) FOR BIAS**

MUHAMMAD FAISAL

Assistant Professor (AI) at Allama Iqbal Open University
System Development Specialist (CCT/NSER) at CRISP World Bank Project BISP
dr.faisalshabbir88@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5797-766X

Abstract

As social protection shifts toward algorithmic decision-making, ensuring the "Fairness, Accountability, and Transparency" (FAT) of models is paramount. This research audits the Proxy Means Test (PMT) currently used by BISP to rank household welfare. Using a range of machine learning fairness metrics, the study investigates whether the algorithm inadvertently discriminates based on regional characteristics, disability status, or ethnic sub-groups. The paper introduces a "Fair-ML" re-weighting technique that optimizes the PMT scores to balance accuracy with social equity. The findings provide a roadmap for policy-makers to implement ethical AI audits, ensuring that no vulnerable group is excluded due to "black-box" algorithmic biases.

Keywords: Algorithmic Bias, PMT Fairness, Ethical AI, Social Equity, BISP Auditing.

USE OF QUINOXALINE TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS

El mostafa Benharaf*

Team of Chemical Processes and Applied Materials, Sultan Moulay Slimane University, Polydisciplinary
Faculty, Beni Mellal, Morocco
Email: ben.haraf@gmail.com

Ahmed Arif

Team of Chemical Processes and Applied Materials, Sultan Moulay Slimane University, Polydisciplinary
Faculty, Beni Mellal, Morocco

Kaoutar Ouahibi

Team of Chemical Processes and Applied Materials, Sultan Moulay Slimane University, Polydisciplinary
Faculty, Beni Mellal, Morocco

Erradi EL mostafa

Molecular Electrochemistry and Inorganic Materials, Sultan Moulay Slimane University, Faculty of
Science and Technology, Beni Mellal, Morocco

Ayoub cherrat

LS3MN2E, CERNE2D, Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat, Rabat, Morocco

Abdellah Zeroual

Molecular Modeling and Spectroscopy Research Team, Faculty of Sciences, Chouaib Doukkali
University, El Jadida, Morocco, El Jadida, Morocco

Mohammed El idrissi

Team of Chemical Processes and Applied Materials, Sultan Moulay Slimane University, Polydisciplinary
Faculty, Beni Mellal, Morocco

Abstract

Dye-sensitized solar cells (DSSCs) represent a promising route toward sustainable and low-cost solar energy conversion. Their overall performance is strongly governed by the electronic and optical properties of the photosensitizing dyes. In this context, quinoxaline-based organic dyes have emerged as highly attractive materials due to their strong electron-accepting character and molecular tunability. These dyes exhibit broad absorption in the visible region and pronounced intramolecular charge-transfer behavior. Density functional theory (DFT) and time-dependent DFT (TD-DFT) calculations were employed to explore their optical, electronic, and photovoltaic properties. TD-DOS analysis reveals a significant contribution of dye frontier orbitals near the Fermi level, favoring efficient charge separation. The calculated HOMO–LUMO alignment with TiO₂ supports fast electron injection and effective dye regeneration. High light-harvesting efficiencies exceeding 85% are achieved. The estimated short-circuit current density reaches 18–20 mA·cm⁻². Open-circuit voltages are predicted in the range of 0.70–0.85 V. Favorable charge-transport characteristics lead to fill factors of 0.70–0.78. As a result, power conversion efficiencies approaching 9–11% are obtained. These findings highlight the strong potential of quinoxaline-based dyes for high-performance DSSCs. Overall, this study demonstrates the relevance of advanced molecular design for next-generation photovoltaic materials.

Keywords: Dye-sensitized solar cells, Quinoxaline derivatives, charge-transfer, TD-DFT, photovoltaic properties.

CORROSION INHIBITION POTENTIAL OF *Casuarina equisetifolia* LEAF EXTRACT ON MILD STEEL IN ACIDIC MEDIUM

Titilayo I. Jesusina*

Department of Science Laboratory Technology, Federal Polytechnic Ilaro, Ogun State, Nigeria

Email: titilayo.jesusina@federalpolyilaro.edu.ng

Khadijat T. Dauda

Department of Chemical Sciences, Bells University of Technology, Ota, Nigeria

Enobong R. Essien

Department of Chemical Sciences, Bells University of Technology, Ota, Nigeria

Violette N. Atasie

Department of Chemical Sciences, Bells University of Technology, Ota, Nigeria

Abstract

The potential of the *Casuarina equisetifolia* leaf extract (CELE) in preventing corrosion of mild steel in 1.0 M hydrochloric acid (HCl) was systematically studied in this research. The plant material was subjected to ethanol extraction, and the extract obtained was tested at different concentrations (0.0-2.5M) and temperatures (303-323K) using gravimetric method at immersion time (1-5hours). Phytochemical screening was used to identify the abundance of secondary metabolites, and their concentrations rose with the dose of the extracts (10–50 mg/mL). Key bioactive compounds were found through GC-MS which are characterized by their ability to donate electrons and adsorb to metal surfaces. FT-IR also verified the presence of functional groups, including C-H, C=O, N-H, C-O-C, and validated the adsorption capabilities of the extract constituents. The gravimetric analysis revealed a significant reduction in weight loss with increasing inhibitor concentration and immersion time, with a maximum inhibition efficiency of 78.85% at 303 K after 4 hours of CELE which was also dependent on the concentration of the extract but not on the temperature, which showed that the process is mainly adsorption-controlled. The results shows that the generation of a protective film on the mild steel surface through the interactions between the metal and the heteroatom-containing phytochemicals contained in the extract prove *Casuarina equisetifolia* leaf extract as an effective, environmentally friendly, and sustainable corrosion inhibitor of mild steel in acidic medium, with promising potential application in industrial operations like acid pickling and descaling.

Keywords: *Casuarina equisetifolia*, mild steel, corrosion, gravimetric, phytochemicals.

IMPACT OF OVER-USAGE OF PESTICIDES IN CROPS CULTIVATION ON FARMERS' HEALTH CONDITIONS: A SOCIOLOGICAL ANALYSIS IN BANGLADESH

Md Azizul Islam*

Department of Sociology, Faculty of Social Science, Jatiya Kabi Kazi Nazrul Islam University,
Mymensingh-2224, Bangladesh
Email: islamaziza.59@gmail.com

Saiful Islam

Department of Sociology, Faculty of Social Science, Jatiya Kabi Kazi Nazrul Islam University,
Mymensingh-2224, Bangladesh

Md. Jakir Hossain

Department of Sociology, Faculty of Social Science, Jatiya Kabi Kazi Nazrul Islam University,
Mymensingh-2224, Bangladesh

Abstract

The primary aim of the study is to evaluate how farming practices by the enterprising farmers affect the health status of farmers due to excessive use of pesticides on crops in Bangladesh. This study was conducted in Shibganj Upazila, Bogura, by using both quantitative and qualitative approaches of 384 and 15 Key Informant Interviews (KIIs). The study is based on the Health Belief Model (HBM) and the Theory of Reasoned Action (TRA), which helps to understand the health behavior of farmers and their use of pesticides, which depends on their personal beliefs and social norms. Main findings and discoveries include that the majority of farmers (74.7) apply pesticides on food crops as well as cash crops, with 51.6% applying the pesticides 2-3 times a week. The extent of usage of protective gear is also poor, as only 12.2% wear masks all the time, and 11.7% wear gloves. Such health problems as headaches (75.8%), facial irritation (63.8%), and weakness (52.9%) have also been reported. Based on chi-square analysis, there are significant relationships between the use of pesticides and health issues with complaints of breathing problems ($\chi^2 = 10.28$, $p = 0.006$) and rashes ($\chi^2 = 15.48$, $p = 0.000$). The Spearman correlation reveals that there is a negative relationship between the frequency of use of pesticides and the health status ($r = -0.172$, $p = 0.001$). The paper also raises the issue of multi-sectoral coordination of policies, as well as suggests that farmers should be better educated, trained, and encouraged to switch to organic options to reduce risks to health.

Keywords: Pesticide Overuse, Farmers' Health, Health Belief Model, Theory of Reasoned Action, Agricultural Safety

OPTIMIZING OUTCOMES IN PSORIASIS: IMPACT OF DENIPLANT NUTRACEUTICALS

Major Gheorghe GIURGIU

Deniplant-Aide Sante Medical Center, Biomedicine, Bucharest, Romania

deniplant@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5449-2712>

med Manole COJOCARU

Academy of Romanian Scientists

Titu Maiorescu University, Faculty of Medicine, Bucharest, Romania

cojocaru.manole@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7192-7490>

Abstract

Background A growing body of evidence highlights that intestinal dysbiosis is associated with the development of psoriasis. The gut–skin axis is the novel concept of the interaction between skin diseases and microbiome through inflammatory mediators, metabolites and the intestinal barrier. The gut microbiome affects skin homeostasis through its influence on the signaling pathways that coordinate epidermal differentiation. The objective of this study was to synthesize current data on the Deniplant natural modulator of the gut microbiome in patients with psoriasis. **Materials and methods** All studies confirmed the association of psoriasis and gut microbiota dysbiosis. We describe the recent advances regarding the interplay between gut microbiota and the skin. Thus, the microbiome can be considered an effective therapeutic target for treating this disorder. **Results** This presentation provides a detailed and comprehensive systematic study regarding gut microbiome in patients with psoriasis. These results are supported by clinical observations based on a case serie showing improvement in psoriatic skin lesions after Deniplant natural modulator. It is still not clear whether psoriasis is an effect or a cause of the observed disbalance between beneficial and pathogenic microbes. In this context, the study provides very interesting results, showing significantly greater changes in the gut microbiome of patients with psoriasis treated Deniplant natural modulator. **Conclusion** There is a significant association between alterations in gut microbial composition and psoriasis. Intestinal dysbiosis is a state of imbalanced gut microbiome that eventually has a negative impact on skin function and integrity. Deniplant natural modulator is a potential therapeutic strategy in patients with psoriasis

Keywords: dysbiosis, microbiome, psoriasis, gut-skin axis, gut barrier, Deniplant nutraceuticals

**ACETAMINOPHEN-INDUCED OXIDATIVE LIVER INJURY IN WISTAR RATS AND ITS
ATTENUATION BY VITAMIN C**

Safinez BOUTRID*

Department of Biology of Organisms, Faculty of Natural and Life Sciences, University of Batna 2,
Algeria.

*safinez.boutrid@univ-batna2.dz

Abstract

Acetaminophen is widely used as an analgesic and antipyretic drug. However, prolonged exposure may induce hepatotoxicity through the generation of reactive oxygen species and disruption of antioxidant defense systems. This study aimed to investigate the effects of acetaminophen on hepatic oxidative status and to evaluate the protective role of vitamin C in Wistar rats. Eighteen male Wistar rats were divided into three groups: control, acetaminophen-treated, and acetaminophen plus vitamin C. After 21 days, liver samples were analyzed for antioxidant markers (TAC, GSH, CAT), and lipid peroxidation (MDA) using spectrophotometric methods. Acetaminophen administration markedly impaired hepatic antioxidant defenses, as evidenced by a reduction in total antioxidant capacity (TAC) from 5.87 ± 1.27 to 0.43 ± 0.17 mg ascorbic acid equivalent/g tissue, a decrease in reduced glutathione (GSH) levels from 13.30 ± 0.66 to 10.45 ± 0.75 $\mu\text{mol/L}$, and a decline in catalase activity from 2.33 ± 0.18 to 1.66 ± 0.14 $\mu\text{mol/min/mg protein}$. In parallel, lipid peroxidation was significantly increased, as shown by elevated malondialdehyde (MDA) levels (0.00187 ± 0.00013 vs. 0.00097 ± 0.00032 $\mu\text{mol/g tissue}$; $p < 0.05$). Vitamin C supplementation significantly ameliorated these alterations, restoring TAC (12.78 ± 3.26 mg ascorbic acid equivalent/g tissue), GSH (21.82 ± 4.54 $\mu\text{mol/L}$), and catalase activity (2.26 ± 0.26 $\mu\text{mol/min/mg protein}$), while reducing MDA levels (0.00107 ± 0.00013 $\mu\text{mol/g tissue}$). Acetaminophen-induced hepatotoxicity is associated with oxidative stress and depletion of endogenous antioxidant defenses. Vitamin C mitigates these alterations by restoring antioxidant balance and reducing lipid peroxidation, highlighting its protective potential against drug-induced liver injury.

Keywords: Acetaminophen; Hepatotoxicity; Oxidative Stress; Vitamin C; Wistar Rats.

**CONTRIBUTION TO LV VOLTAGE REGULATION BY STORAGE-LESS PV INVERTERS:
LIMITATIONS OF THE Q (U) CHARACTERISTIC CURVE AND A SOLUTION USING
TRANSIENT CAPACITIVE REACTIVE POWER INJECTION**

Samira Boumous

Laboratory of Electrical Engineering, Electronic and Renewable Energy, University of Souk Ahras,
Algeria

*Corresponding authors: samira.boumous@univ-soukahras.dz

Zouhir Boumous

Laboratory of Electrical Engineering, Electronic and Renewable Energy, University of Souk Ahras,
Algeria

Sabrine Morakeb

Laboratory of Electrical Engineering, Electronic and Renewable Energy, University of Souk Ahras,
Algeria

Rayane Yasmine Mahfoudi

Laboratory of Electrical Engineering, Electronic and Renewable Energy, University of Souk Ahras,
Algeria

Abstract

High penetration of photovoltaic (PV) systems in low-voltage (LV) distribution grids frequently causes voltage rise beyond permissible limits. Storage-less inverters typically rely on the Q(U) droop characteristic, which absorbs inductive reactive power when voltage exceeds a threshold. However, this method presents two critical shortcomings in LV networks: first, the inverter's apparent power constraint forces a reduction in active power once reactive power is injected; second, LV grids have a high resistance-to-reactance (R/X) ratio, making voltage more sensitive to active power than to reactive power. Consequently, Q(U) control alone often fails to maintain voltage within limits without severe active power curtailment. This paper proposes a novel transient strategy using short pulses of capacitive (leading) reactive power. When overvoltage is detected, the inverter injects capacitive reactive power for 500 ms to 2 s, creating a temporary local voltage dip that counteracts the rise. Unlike traditional Q(U), this approach does not require energy storage and does not permanently reduce active power output. The capacitive injection exploits the resistive component of LV impedance – a feature usually ignored in grid codes. Simulations are conducted on a CIGRE LV benchmark feeder with six storage-less PV inverters (each 5 kW). Results show that conventional Q(U) droop allows voltage to exceed 1.07 p.u. once PV generation surpasses 80 % of rated power. The proposed transient capacitive boost reduces overvoltage by 15-20 % and resets the operating point, enabling inverters to resume nominal active power delivery after each pulse. The solution requires minimal control modifications (one additional state machine) and complies with existing standards (VDE-AR-N 4105, IEEE 1547) as an emergency function. Experimental validation on a 5 kW hardware prototype confirms transient stability and practical feasibility.

Keywords: PV inverter; LV voltage regulation; Q(U) characteristic; capacitive reactive power; transient control.

**PHYSICS-INFORMED EXPLAINABLE DEEP LEARNING FRAMEWORK FOR EARLY
FAULT DETECTION AND PROGNOSTICS IN DFIG-BASED WIND FARMS**

***Zouhir Boumous**

Laboratory of Electrical Engineering, Electronic and Renewable Energy, University of Souk Ahras,
Algeria

*Corresponding authors: zohir.boumous@univ-soukahras.dz

Samira Boumous

Laboratory of Electrical Engineering, Electronic and Renewable Energy, University of Souk Ahras,
Algeria

Rayane Yasmine Mahfoudi

Laboratory of Electrical Engineering, Electronic and Renewable Energy, University of Souk Ahras,
Algeria

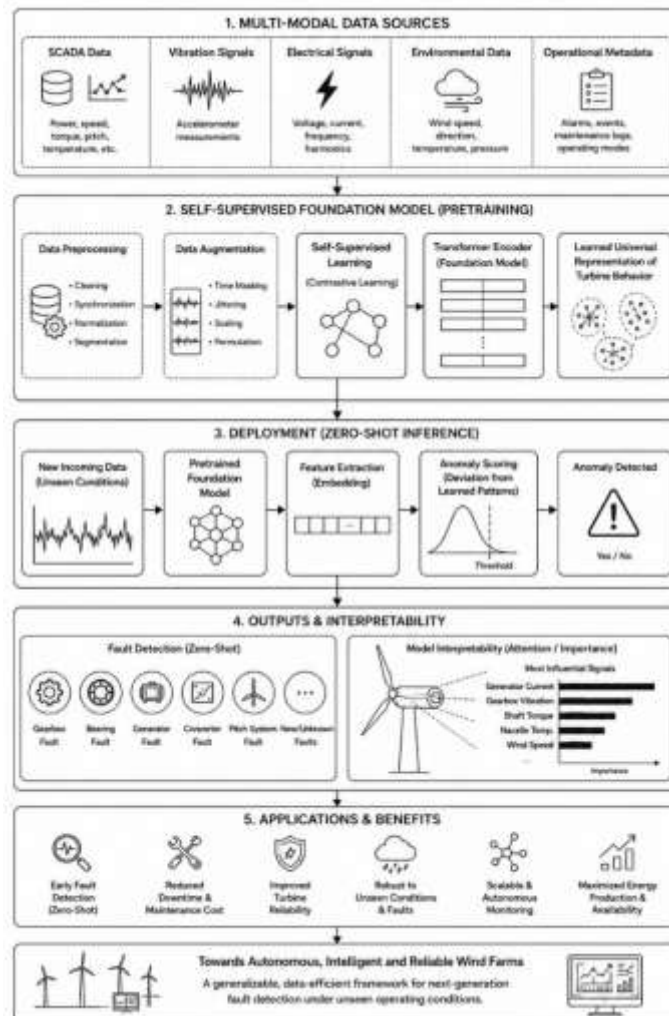
Sabrine Morakeb

Laboratory of Electrical Engineering, Electronic and Renewable Energy, University of Souk Ahras,
Algeria

Abstract

The increasing penetration of wind energy into modern power systems requires advanced monitoring techniques capable of ensuring high reliability, availability, and operational safety. This paper proposes an innovative Physics-Informed Explainable Deep Learning (PI-XDL) framework for early fault detection and prognostics in Doubly Fed Induction Generator (DFIG)-based wind farms. The proposed approach integrates real-time Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) data, electrical measurements, and turbine operating conditions with physics-based constraints derived from generator and aerodynamic models. A hybrid neural architecture combining Temporal Convolutional Networks (TCN), Long Short-Term Memory (LSTM) networks, and attention mechanisms is developed to identify incipient faults affecting generators, converters, bearings, pitch systems, and grid-interface components. To enhance trustworthiness and industrial adoption, Explainable Artificial Intelligence (XAI) techniques are incorporated to highlight the key variables contributing to each fault decision. Furthermore, a Remaining Useful Life (RUL) estimation module predicts component degradation trajectories, enabling predictive maintenance scheduling. The framework is validated under multiple operating scenarios, including variable wind conditions, grid disturbances, and sensor uncertainties. Simulation results demonstrate superior detection accuracy, reduced false alarm rates, and earlier fault identification compared with conventional machine learning methods. The proposed methodology provides a practical pathway toward intelligent, resilient, and self-aware wind farms supporting the next generation of digitalized renewable energy systems.

Keywords: Wind Farm Monitoring, Fault Detection and Diagnosis, Self-Supervised Learning, Zero-Shot Learning, Foundation Models, Transformer Networks, Anomaly Detection.



INTEGRATED SOLAR DESALINATION WITH THERMAL STORAGE AND ENERGY RECOVERY

Badre Zinaoui

Chemistry Department, Mohammed V University in Rabat
badre.zinaoui@um5r.ac.ma

Pr. Labjar Najoua

Chemistry Department, Mohammed V University in Rabat
n.labjar@um5r.ac.ma

Pr. EL Hajjaji souad

Chemistry Department, Mohammed V University in Rabat
s.elhajjaji@um5r.ac.ma

ELABBARI Chaimaa

Chemistry Department, Mohammed V University in Rabat
Chaimaa.elabbari@um5r.ac.ma

Abstract

This work focuses on the development and optimization of an integrated solar desalination system that combines photothermal evaporation, thermal energy storage, and energy recovery to enhance freshwater production. The system uses high-efficiency photothermal materials to convert solar radiation into heat, enabling rapid water evaporation under low energy consumption. A thermal storage unit - typically based on molten salts or phase-change materials ensures continuous desalination during periods of low or no sunlight, thereby stabilizing the system's performance. Additionally, energy recovery components, such as heat exchangers or thermoelectric modules, are incorporated to capture and reuse waste heat, improving the overall thermodynamic efficiency. The integration of these technologies results in a highly sustainable, autonomous, and cost-effective desalination solution suitable for remote and coastal regions facing water scarcity. This approach contributes to reducing reliance on conventional, energy-intensive desalination methods while promoting clean and renewable water production.

Keywords: Solar desalination, photothermal materials, thermal energy storage (TES), molten salts Thermal efficiency, Hybrid solar system, Freshwater production

**HEAVY METAL CONTAMINATION AND POLLUTION ASSESSMENT OF SOILS AROUND
GOLD MINING SITES IN MINNA AND KATAEREGGI, NORTH-CENTRAL NIGERIA**

Isaiah Baba Musa

Federal University Of Technology

Abstracts

Mining activities are major sources of heavy metal accumulation in soils, posing significant risks to environmental quality and public health. This study assessed the physicochemical properties, heavy metal concentrations, and contamination status of soils from active mining sites in Minna and Katareggi, North-Central Nigeria, using integrated pollution indices. Soil samples were analysed for Pb, Cr, Cu, As, Ni, Zn, Mn, and Fe using standard analytical methods, and concentrations were compared with WHO/FAO guideline values. The results showed that the soils were neutral to slightly alkaline, with high infiltration capacity and low organic matter, particularly at Katareggi, conditions that may enhance metal mobility and bioavailability. Copper was the principal contaminant, with a mean concentration of 69.28 mg kg⁻¹ at Katareggi, exceeding the recommended limit of 36 mg kg⁻¹, while Pb approached the regulatory threshold at one sampling point (79.86 mg kg⁻¹). Iron was consistently abundant across both sites, reflecting the lateritic nature of the soils, whereas Cr, Ni, Zn, and As remained within permissible limits. Pollution indices indicated low contamination for most metals, with contamination factor (CF), geo-accumulation index (Igeo), and pollution load index (PLI = 0.38) collectively suggesting the absence of widespread multi-metal pollution. However, enrichment factor (EF) analysis revealed moderate to significant enrichment of Cu and Pb at Katareggi, indicating localized anthropogenic inputs associated with mining activities. One-way ANOVA further revealed significant spatial variations in Pb ($p = 0.0366$) and Mn ($p = 0.0158$) between the two mining sites. Overall, the findings revealed Cu and Pb as the primary contaminants of environmental concern and demonstrate the value of integrating multiple pollution indices to distinguish anthropogenic enrichment from natural geogenic contributions. The study provides baseline data to support targeted remediation, sustainable mining management, and long-term environmental monitoring in mining-impacted areas of North-Central Nigeria.

Keywords: Heavy metals; soil contamination; copper; lead; pollution indices; mining; environmental monitoring; North-Central Nigeria.

**APPLICATION OF HEPTAENE MACROLIDE ANTIBIOTIC AUREOFUNGIN IN
AGRICULTURE AS HIGHLY EFFECTIVE ECOLOGICALLY SAFE FUNGICIDE FOR
PLANT PROTECTION**

Dr. Valery V. Belakhov

Technion – Israel Institute of Technology, Schulich Faculty of Chemistry (formerly), Haifa, Israel
chvalery@g.technion.ac.il
ORCID NO: 0000-0003-1918-974X

Abstract

The intensive use of chemical agents in agriculture has led to environmental degradation, the emergence of more resistant strains of pathogenic microorganisms that cause plant diseases, and other undesirable consequences. In this regard, research focused on the practical application of antibiotics has attracted the attention of researchers in recent decades. One of the key requirements for antibiotics used in plant protection is that they must not be used in medical practice, so as to prevent harmful insects and microorganisms from developing resistance to them. In this connection, the use of non-medical antibiotics (NMAs) for plant protection is highly relevant. Aureofungin, an antifungal heptaene macrolide antibiotic first obtained by Indian researchers via microbiological synthesis, has not found application in the medical treatment of mycoses due to unacceptable biomedical properties, such as high toxicity, poor tolerability upon systemic administration, and a relatively narrow spectrum of antifungal activity. Consequently, aureofungin was considered by researchers as an antifungal NMAs for use in agriculture. It should be emphasized that the key factors in the non-medical use of polyene macrolide antibiotics (including aureofungin) as highly effective fungicides for plant protection include not only their broad-spectrum antifungal activity against fungal phytopathogens but also their rapid and easy degradation into non-toxic compounds following application. This report systematizes literature data on the use of aureofungin as an environmentally safe fungicide in agriculture. It is shown that aureofungin exhibits high fungicidal activity against fungal phytopathogens belonging to various classes that cause diseases in agricultural crops. It should be noted that the use of aureofungin and pesticide compositions based on this heptaene macrolide antibiotic is characterized by high fungicidal activity against fungal diseases of cultivated plants, low toxicity to humans and animals, and the ability to degrade into non-toxic compounds within natural nutrient cycles, thereby ensuring environmental safety during its use.

Keywords: Non-Medical Antibiotics, Aureofungin, Fungicides, Phytopathogenic Fungi, Plant Diseases, Environmental Safety

**BIOCHEMISTRY AS THE BEDROCK OF LIFE SCIENCES: ITS ROLE IN HEALTH,
AGRICULTURE, AND BIOTECHNOLOGY**

Ibrahim Sani Dikko

Umaru Musa Yar'adua University Katsina

Ibrahimsanid9@gmail.com

ORCID: 0009-0006-1401-511

Abstract

Biochemistry forms the molecular foundation of the life sciences by explaining the chemical processes that sustain living organisms. It provides the knowledge required to understand the structure and function of biomolecules such as proteins, carbohydrates, lipids, nucleic acids, vitamins, enzymes, and hormones. This field has become a central part of modern science because it links biology with chemistry, medicine, agriculture, environmental science, and biotechnology. Knowledge gained from biochemistry has transformed the understanding of normal body functions, disease development, food production, and industrial innovation. As scientific progress continues, biochemistry remains one of the major drivers of discoveries that improve human well-being and economic development. In human health, biochemistry has strengthened disease diagnosis, preventive medicine, and treatment through the identification of biochemical markers, metabolic pathways, enzyme activities, and genetic variations associated with many disorders. It supports vaccine production, drug design, molecular diagnostics, nutritional medicine, and precision healthcare. During global public health emergencies, biochemical knowledge has guided the development of diagnostic kits, therapeutic agents, and vaccines within relatively short periods. The field also supports studies on cancer, diabetes, cardiovascular diseases, infectious diseases, and inherited metabolic disorders, thereby improving patient care and clinical decision-making. Agriculture has equally benefited from biochemical knowledge through better crop nutrition, soil fertility management, plant metabolism, pest control, and livestock improvement. Biochemical approaches have promoted the production of crops with higher nutritional quality, improved resistance to environmental stress, and greater productivity. They have also enhanced food preservation, quality control, and food safety while reducing post-harvest losses. These advances play an important role in strengthening food availability and supporting sustainable agricultural systems in response to population growth and climate-related challenges. Biotechnology represents another area where biochemistry has produced remarkable progress. Knowledge of enzymes, microbial metabolism, recombinant DNA technology, protein engineering, and fermentation has accelerated the production of pharmaceuticals, industrial enzymes, biofuels, biodegradable materials, and diagnostic products. Modern techniques involving genomics, proteomics, metabolomics, gene editing, and bioinformatics continue to expand the boundaries of biomedical and agricultural innovation while opening new opportunities for scientific discovery and industrial growth. This review highlights the enduring value of biochemistry as the molecular basis of the life sciences and emphasizes its broad influence on health, agriculture, and biotechnology. Continued investment in biochemical education, research, and technological innovation will strengthen scientific capacity, support sustainable development, improve public health, enhance food systems, and promote the creation of practical solutions to emerging global challenges.

Keywords: Biochemistry; Life Sciences; Human Health; Agriculture; Biotechnology; Biomolecules; Molecular Diagnostics; Drug Development; Food Security; Genomics.

**SYNTHESIS AND BIOLOGICAL EVALUATION OF PYRIDYLPYPERAZINE-BASED
CARBODITHIOATES AS UREASE INHIBITORS**

Sumayya Akram

PhD Scholar, Department of Chemistry, Government College University Faisalabad, Pakistan
Email: sumayya.201002384@gcuf.edu.pk

Prof. Dr. Matloob Ahmad

Department of Chemistry, Government College University Faisalabad, Pakistan
Email: matloob.ahmad@gcuf.edu.pk

Dr. Sana Aslam

Department of Chemistry, Government College Women University Faisalabad, Pakistan
Email: dr.sana@gcwuf.edu.pk

Abstract

The urease enzyme is acknowledged as an effective therapeutic agent to be used in the treatment of the virulent *Helicobacter pylori* bacterium due to its central contribution to the colonization and growth of the bacterium in the gastric mucosa. To manage the adverse effects of bacterial infections, urease prohibition demonstrates itself as one of the feasible and efficient methods. The present study was intended to obtain the synthesis of pyridylpiperazine-linked carbodithioate analogs **5a-5n** and **7a-7n**, which could be used as possible candidates of drug in the prevention of bacterial infections by urease inhibition. Their structural explication using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was then tested using **7a-7n** to determine their capability to prevent the urease enzyme. During *in vitro* assessment by using thiourea as the standard drug, it was noted that all the compounds synthesized showed a great activity of inhibition in comparison to the reference drug. Out of the compounds tested, **5j** (with an o-tolyl moiety) was found to be the most efficient inhibitor exhibiting high urease inhibition with an IC_{50} of $5.16 \pm 2.68 \mu M$. This is a significantly lower IC_{50} value than thiourea ($23 \pm 0.03 \mu M$), the most potent potential of inhibition. In molecular docking of **5j** in the active site of urease, a vast number of interesting interactions have been observed.

RESPONSIVENESS OF 5HT-1A RECEPTORS IN ADULT RATS FOLLOWING PRENATAL STRESS INDUCED SUSCEPTIBILITY TO APOMORPHINE ADDICTION

Huma Ikram*

Neurochemistry and Biochemical Neuropharmacology Research Unit, Department of Biochemistry,
University of Karachi, Karachi-75270, Pakistan

Rumaisa Zakir

Neurochemistry and Biochemical Neuropharmacology Research Unit, Department of Biochemistry,
University of Karachi, Karachi-75270, Pakistan

Darakhshan J. Haleem

Neurochemistry and Biochemical Neuropharmacology Research Unit, Department of Biochemistry,
University of Karachi, Karachi-75270, Pakistan.

*E-mail: huma_biochemist@yahoo.com

Abstract

Prenatal stress is an essential factor influencing the development of neuropsychiatric disorders and substance abuse vulnerability. This study examines the results of prenatal stress at the susceptibility to apomorphine dependency and the responsiveness of 5HT-1A receptors in adult rats formerly subjected to prenatal stress. Pregnant rats were subjected to unpredictable chronic mild stress on day 14 of pregnancy until birth, and their offspring were assessed in adulthood. Behavioural evaluation revealed that prenatally stressed rats exhibited a notably higher preference for apomorphine paired compartment in conditioned place preference paradigm, indicating potentiated susceptibility to addiction. Data on 5-HT syndrome and neurochemical analysis suggested altered 5HT-1A receptor responsiveness in these rats, suggesting that prenatal stress induces long-term modifications in serotonergic signalling pathways. These findings provide novel insights into how prenatal environmental factors contribute to the substance addiction and spotlight the role of 5HT-1A receptor modulation in mediating these outcomes. Understanding these mechanisms is essential for developing preventive and treatment strategies for addiction rooted in early life stress.

Keywords: prenatal stress; apomorphine dependency; 5HT-1A receptors; 5-HT syndrome; conditioned place preference

THE GUT-BRAIN-SKIN AXIS IN ACNE: IMPACT OF POLENODERM

Major Gheorghe Giurgiu

Deniplant-Aide Sante Medical Center, Biomedicine, Bucharest, Romania
deniplant@gmail.com, 012371
<https://orcid.org/0000-0002-5449-2712>

Prof. dr. Manole Cojocaru

Titu Maiorescu University, Faculty of Medicine, Bucharest, Romania
cojocaru.manole@gmail.com, 031593
<https://orcid.org/0000-0002-6871-577X>

Abstract

Background It is increasingly believed that the interaction between skin microbes and host immunity plays an important role in acne. Acne also has close connections with the gastrointestinal tract, and many argue that the gut microbiota could be involved in the pathogenic process of acne. The emotions of stress, have been hypothesized to aggravate acne by altering the gut microbiota. The presence of a gut-brain-skin axis that connects gut microbes, oral probiotics, and diet, currently an area of intense scrutiny, to acne severity. This study concentrates on the skin and gut microbes in acne, the role that the gut-brain-skin axis plays in the immunobiology of acne, and newly emerging microbiome-based therapies that can be applied to treat acne. **Objective** The purpose of this study was to compare the diversity of the skin microbiota in acne patients before and after taking Polenoderm. **Materials and methods** A longitudinal cohort study was performed on 20 participants with moderate to severe facial acne with no recent use of oral and topical antibiotics/retinoids. **Results** Hence, it is crucial to understand Polenoderm impact on the acne skin microbiota which is thought to be perturbed, our study provides insight into the skin microbiota in acne and how it is modulated by Polenoderm and diet. **Conclusion** Acne also has close connections with the gastrointestinal tract, and many argue that the gut microbiota could be involved in the pathogenic process of acne. As understanding of the microbiome in healthy skin and the pathophysiology of acne continues to develop, new therapeutic targets are arising.

Keywords: acne, gut-brain-skin axis microbiota, Polenoderm, diet

**TECHNOLOGY INTEGRATION IN SECONDARY STEM CLASSROOMS: EXAMINING THE
ROLE OF TEACHER DEMOGRAPHICS**

Afshan Butt

Department of Education, University of Management and Technology, Lahore, Pakistan

Afshan Naseem

Department of Education, University of Management and Technology, Lahore, Pakistan

Abstract

The present study examined the influence of teacher demographic characteristics on technology integration among secondary school STEM teachers in Lahore, Pakistan. A quantitative research design, guided by the positivist paradigm, was employed to investigate differences in technology integration across demographic groups. Four null hypotheses were formulated and tested. Data were collected through a survey questionnaire using convenience sampling from 451 secondary school STEM teachers working in public and private schools in Lahore. The instrument's validity was established through expert review, while reliability was confirmed through pilot testing. Descriptive statistics, independent-samples *t*-tests, and one-way ANOVA were used to analyze the data. The findings indicated significant differences in technology integration based on several demographic characteristics. Female teachers demonstrated higher levels of technology integration than their male counterparts. Teachers aged over 30 years reported greater technology integration than those under 30 years of age. Significant differences were also observed across teaching experience categories, with varying levels of technology integration among teachers with less than one year, 1–5 years, and 6–10 years of experience. Based on these findings, the study recommends strengthening Technology, Pedagogy, and Content Knowledge (TPACK)-based professional development, enhancing technological infrastructure, and providing continuous technical support to improve sustainable technology integration across secondary STEM classrooms.

Keywords: Technology Integration, STEM Education, TPACK, Mathematics Education,

STRUCTURE-BASED DRUG REPURPOSING TO INHIBIT THE DNA GYRASE OF
Mycobacterium tuberculosis

Balasubramani G L

School of Biotechnology, Jawaharlal Nehru University, New Delhi – 110067

Email: glbala87@gmail.com

Rinky Rajput

School of Biotechnology, Jawaharlal Nehru University, New Delhi – 110067

Manish Gupta

School of Biotechnology, Jawaharlal Nehru University, New Delhi – 110067

Pradeep Dahiya

National Institute of Plant Genome Research, Aruna Asaf Ali Marg, New Delhi

Jitendra K Thakur

National Institute of Plant Genome Research, Aruna Asaf Ali Marg, New Delhi

Rakesh Bhatnagar

Banaras Hindu University, Banaras, Uttar Pradesh-221005, India

Abhinav Grover

School of Biotechnology, Jawaharlal Nehru University, New Delhi - 110067.

Abstract

Drug repurposing is an alternative avenue for identifying new drugs to treat tuberculosis (TB). Although TB can be cured with anti-tubercular drugs, the emergence of multidrug-resistant and extensively drug-resistant strains of *Mycobacterium tuberculosis* H37Rv (Mtb), as well as the significant death toll globally, necessitate the development of effective drugs to treat TB. In this study, drug repurposing approach was employed to address this drug resistance problem by screening drugbank database to identify novel inhibitors of the Mtb target enzyme, DNA gyrase. The compounds were screened against the ATPase domain of gyrase B subunit (MtbGyrB47), and the docking results showed Echinacoside, Doxorubicin, Epirubicin, and Idarubicin possess high binding affinities against MtbGyrB47. Comprehensive assessment using fluorescence spectroscopy, SPR, and CD titration studies revealed that Echinacoside as a potent binder against MtbGyrB47. Further, ATPase, and DNA supercoiling assays exhibited IC₅₀ values of 2.1-4.7 μ M for Echinacoside, Doxorubicin, Epirubicin, and Idarubicin. Among these compounds, the least MIC₉₀ of 6.3 μ M and 12 μ M were observed for Epirubicin and Echinacoside, respectively. Hence, our findings indicate that Echinacoside and Epirubicin target mycobacterial DNA gyrase, inhibit its catalytic cycle, and retard mycobacterium growth. Further these compounds exhibits potential scaffolds for optimizing novel anti-mycobacterial agents that can act on drug-resistant strains.

**BEYOND THE PHENOLPHTHALEIN TEST: A CRITICAL COMPARISON OF CONCRETE
CARBONATION ASSESSMENT METHODS**

Dr. Poh-Yee LOH

Centre for Building, Construction & Tropical Architecture (BuCTA), Faculty of Built Environment,
Universiti Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia

Email: lohpoohyee@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9064-1914

Prof. Dr. Payam SHAFIGH

Department of Civil Engineering, School of Architecture and Energy Engineering,
Wenzhou University of Technology, Wenzhou 325000, Zhejiang, China
Centre for Building, Construction & Tropical Architecture (BuCTA), Faculty of Built Environment,
Universiti Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia

Email: pshafigh@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8576-3984

Dr. Muhammad ASLAM

Department of Civil Engineering, School of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of
Technology, Wenzhou 325000, Zhejiang, China

Email: maslam@wzut.edu.cn

ORCID: 0000-0002-4126-0453

Dr. Mohamad Rizal BAHARUM

Department of Building Surveying, Faculty of Built Environment, Universiti Malaya, 50603 Kuala
Lumpur, Malaysia.

Email: mrizal@um.edu.my

ORCID: 0000-0003-4120-9444

Abstract

Nowadays, steel reinforced concrete is widely used in structural elements for buildings and infrastructure. From a materials perspective, its main weakness lies in the susceptibility of steel to corrosion. Corrosion not only affects the strength of the steel but also causes the internal steel reinforcement to expand leading to concrete spalling. Portland cement paste, the binder of concrete, provides a highly alkaline environment in concrete and provides passive protective film on the rebars. Concrete is susceptible to carbonation when exposed to carbon dioxide and moisture from the environment, and this can degrade the durability of reinforced concrete gradually. Concrete carbonation assessment is crucial in durability assessment of a concrete structure. Phenolphthalein test is the most commonly used method for assessing the concrete carbonation. However, there are several other methods for carbonation assessment of concrete such as electrochemical method, optical microscopy, thermogravimetric method and spectroscopy method. This study presents the advantages and limitations of each method to advance the research on concrete carbonation.

Keywords: concrete pH, forensic engineering, marine structure, rebar corrosion, structural health monitoring

**ENHANCING OLIVE POMACE COMPOSTING USING NATURAL BIOCHAR:
EXPERIMENTAL EVALUATION UNDER PILOT-SCALE CONDITIONS**

Mouad Lazrak

Management, Higher School of Technology, Ibn Zohr University, Agadir

***Correspondence:** mouad.lazrak@edu.uiz.ac.ma

Ghita Ait Baddi

Management, Higher School of Technology, Ibn Zohr University, Agadir

Maryam Mirouch

Management, Higher School of Technology, Ibn Zohr University, Agadir

Ayour Jamal

Management, Higher School of Technology, Ibn Zohr University, Agadir

Dhin Ikram

Management, Higher School of Technology, Ibn Zohr University, Agadir

Soukaina Kaoui

Laboratory of Mechanics, Energy and Environmental Processes, National school of applied sciences, Ibn Zohr University, Agadir

Chebli Bouchra

Management, Higher School of Technology, Ibn Zohr University, Agadir

Abstract

The olive oil industry generates large amounts of olive pomace, which represents one of the main agro-industrial wastes in Mediterranean countries. Improper disposal of this biomass may cause serious environmental problems, including soil and water contamination and greenhouse gas emissions. Composting is considered an environmentally friendly and cost-effective strategy for converting olive pomace into a stable organic fertilizer. However, the high moisture content, low porosity, and the presence of phenolic compounds may reduce the efficiency of the composting process. This study investigates the effect of natural biochar addition on the composting performance of olive pomace collected from an olive oil processing unit located in Agadir, Morocco. A pilot-scale composting experiment was conducted using 100 kg of fresh olive pomace mixed with 5% (w/w) natural biochar. The composting process was monitored under controlled aerobic conditions. The evolution of key physicochemical parameters, including temperature, moisture content, pH, electrical conductivity, and organic matter degradation, was evaluated throughout the composting period. The influence of biochar on compost stabilization and maturity was also assessed. The results indicate that the incorporation of natural biochar improved compost aeration and moisture retention, promoted microbial activity, and accelerated organic matter degradation. The amended compost maintained a longer thermophilic phase, contributing to enhanced pathogen reduction and organic waste stabilization. Moreover, biochar helped reduce nutrient losses and improved the physicochemical quality of the final compost, making it more suitable for agricultural applications.

Keywords: Olive pomace, composting, natural biochar, organic waste valorization, circular economy, sustainable agriculture, Morocco.

**RISK-AWARE CRITERIA PRIORITIZATION FOR TEMPORARY WAREHOUSE DECISIONS
IN LUBRICANT OIL SUPPLY CHAINS**

Dr. Caner TAÇOĞLU (ORCID: 0000-0001-7489-1318)

Izmir University of Economics, Department of Industrial Engineering, Izmir-Türkiye

Email: caner.tacoglu@ieu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7489-1318>

Özet

Günümüz tedarik zincirlerinde işletmeler, talep dalgalanmaları ve dönemsel kapasite artışları nedeniyle kısa süreli dış depo kullanmak zorunda kalabilmektedir. Bu durum özellikle madeni yağ gibi güvenlik, izlenebilirlik ve mevzuat uyumu gerektiren ürünlerde depo seçimini yalnızca maliyet veya konum kararı olmaktan çıkarmaktadır. Bu çalışma, talebe bağlı depolama yaklaşımı altında geçici depo seçiminde hangi kriterlerin öncelikli olduğunu belirlemeyi amaçlamaktadır. Araştırma, Türkiye’de faaliyet gösteren büyük bir madeni yağ üreticisinden alınan uzman görüşlerine dayanmaktadır. Literatür incelemesi ve şirket uzmanlarıyla yapılan değerlendirmeler sonucunda yedi ana kriter ve yirmi yedi alt kriterden oluşan hiyerarşik bir karar yapısı geliştirilmiştir. Kriter ağırlıkları beş alan uzmanının değerlendirmeleri kullanılarak Best Worst Method ile hesaplanmıştır. Bulgulara göre en önemli ana kriterler HSE ve mevzuat uyumu, konum ve erişilebilirlik ile operasyonel kontrol ve güvenlidir. Alt kriter düzeyinde ise fabrika yakınlığı, fiyatlandırma modeli, izlenebilirlik sistemi, acil durum hazırlığı ve sözleşme esnekliği öne çıkmaktadır. Bu öncelikler, geçici depoların firmanın ana operasyonlarından ayrı düşünülmemesi gerektiğini göstermektedir. Sonuçlar, geçici depo seçiminin yalnızca en ucuz depo alanını bulma problemi olmadığını göstermektedir. Yöneticiler, kısa süreli depo kapasitesi kullanırken güvenlik, operasyonel süreklilik, ürün kontrolü ve esnek sözleşme koşullarını birlikte değerlendirmelidir. Çalışma, talebe bağlı depolama literatürüne uygulamaya dönük bir karar çerçevesi sunmakta ve güvenlik hassasiyeti yüksek sektörlerde geçici depo seçeneklerinin daha sistematik biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Geçici Depo Seçimi; Talebe Bağlı Depolama; Best-Worst Method; Tedarik Zinciri; Risk Yönetimi

Abstract

In contemporary supply chains, firms may need to use short term external warehouse capacity because of demand fluctuations and seasonal capacity increases. This situation makes warehouse selection more than a cost or location decision, especially for products such as lubricant oil that require safety, traceability, and regulatory compliance. This study aims to determine which criteria should be prioritized in temporary warehouse selection under an on demand warehousing approach. The research is based on expert judgments obtained from a large lubricant oil producer operating in Türkiye. After reviewing the literature and consulting company experts, a hierarchical decision structure consisting of seven main criteria and twenty seven sub criteria was developed. The criteria weights were calculated using the Best Worst Method based on the evaluations of five domain experts. The findings show that the most important main criteria are HSE and regulatory compliance, location and accessibility, and operational control and safety. At the sub criterion level, factory proximity, pricing model, traceability system, emergency preparedness, and contract flexibility emerge as the most influential factors. The results indicate that temporary warehouse selection is not simply a problem of finding the cheapest storage space. Managers should jointly consider safety, operational continuity, product control, and flexible contract conditions when using short term warehouse capacity. The study provides a practice oriented decision framework for the on demand warehousing literature and supports a more systematic evaluation of temporary warehouse options in safety sensitive sectors.

Keywords: Temporary Warehouse Selection; On-Demand Warehousing; Best-Worst Method; Supply Chain; Risk Management

SINIF DENGESİZ VERİ DAĞILIMLARINDA DINOv3 İLE BİTKİ SINIFLANDIRMA

Dr. Öğr. Üyesi Duygu SİNANÇ TERZİ

Ankara University, Faculty of Applied Sciences, Department of Digital Game Design
Ankara-Türkiye

Email: duyguterzi@ankara.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3332-9414>

Özet

Bitki sınıflandırması, türler arasındaki yüksek görsel benzerlik ve sınıf içi çeşitlilik nedeniyle bilgisayarlı görü alanının zorlu problemlerinden biridir. Doğal ortamda elde edilen bitki görüntüleri; karmaşık arka planlar, değişken aydınlatma koşulları ve farklı çekim açıları nedeniyle ek zorluklar içermektedir. Ayrıca gerçek dünya veri kümeleri genellikle dengesiz sınıf dağılımına sahiptir ve çok sayıda nadir tür sınırlı sayıda örnekle temsil edilir. Bu durum, öğrenme sürecinin çoğunluk sınıflara yönelmesine neden olmakta ve az örnekli türlerin doğru şekilde sınıflandırılmasını güçleştirmektedir. Son yıllarda büyük ve çeşitli veri kümeleri üzerinde önceden eğitilmiş temel modeller, güçlü temsil öğrenme ve genelleme yetenekleri sayesinde bu probleme yönelik umut verici sonuçlar sunmaktadır. Bu modeller arasında yer alan DINOv3, kendinden denetimli öğrenme yaklaşımıyla geniş ölçekli görüntü verilerinden ayırt edici görsel özellikler öğrenmekte ve farklı görevlerde aktarılabilir temsiller üretebilmektedir. Bu çalışmada, DINOv3'ün dengesiz bitki veri kümelerindeki sınıflandırma performansı incelenmiştir. Deneylerde, 306.087 renkli görüntü, 1000 bitki türü ve 111 bitki familyası içeren Pl@ntNet-300K-v2 veri kümesi kullanılmıştır. İlk aşamada DINOv3 ile tüm görüntüler için öznitelik temsilleri çıkarılmıştır. Elde edilen temsil vektörleri yapay sinir ağı ve lojistik regresyon tabanlı sınıflandırıcılar kullanılarak tür ve familya düzeylerinde değerlendirilmiştir. Geleneksel derin öğrenme çalışmalarından farklı olarak bu çalışmada, sıfırdan eğitilen veya ince ayar yapılan modeller yerine, DINOv3'ün önceden öğrenilmiş görsel temsillerinin dengesiz bitki veri kümelerindeki ayırt ediciliği değerlendirilmiştir. Familya düzeyindeki sınıflandırma sonuçlarında yapay sinir ağı modeli %97.95 doğruluk ve %82.45 makro F1 skoru elde ederken, lojistik regresyon modeli %94.27 doğruluk ve %72.81 makro F1 skoru üretmiştir. Tür düzeyindeki sınıflandırmada ise yapay sinir ağı %85.91 doğruluk ve %51.49 makro F1 skoruna ulaşırken, lojistik regresyon %71.63 doğruluk ve %41.26 makro F1 skoru elde etmiştir. Sonuçlar, familya sınıflandırmasının tür sınıflandırmasına kıyasla daha başarılı olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, DINOv3 tarafından öğrenilen temsillerin genel taksonomik yapıyı etkili biçimde yakalayabildiğini, ancak ince tür ayrımlarında zorlandığını ortaya koymaktadır. Hata analizleri, yanlış sınıflandırmaların büyük ölçüde aynı familyada yer alan morfolojik olarak benzer türler arasında gerçekleştiğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, DINOv3 tabanlı görsel temsillerin dengesiz bitki veri kümelerinde yüksek doğruluk ve makro F1 performansı sağlayabildiğini göstermektedir. Özellikle familya düzeyindeki sonuçlar, modelin sınıf dengesizliğine rağmen biyolojik olarak anlamlı taksonomik ilişkileri başarılı şekilde temsil edebildiğini ortaya koymaktadır. Bulgular, ince ayar gerektirmeden kullanılan DINOv3 temsillerinin biyolojik sınıflandırma uygulamalarında etkili bir özellik çıkarıcı olarak kullanılabileceğini ve sınırlı örnek içeren türlerin bulunduğu gerçek dünya senaryoları için önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Bitki Sınıflandırma, Sınıf Dengesizliği, Temel Modeller

PLANT CLASSIFICATION WITH DINOv3 UNDER IMBALANCED CLASS DISTRIBUTIONS

Abstract

Plant classification is one of the challenging problems in computer vision due to the high visual similarity between species and the large intra-class variability. Plant images acquired in natural environments introduce additional challenges, including complex backgrounds, varying illumination conditions, and different viewing angles. Furthermore, real-world datasets often exhibit imbalanced class distributions, where many rare species are represented by only a limited number of samples. This imbalance causes learning algorithms to focus on majority classes and makes the accurate classification of underrepresented species more difficult. In recent years, foundation models pre-trained on large and diverse datasets have shown promising results for addressing this problem due to their strong representation learning and generalization capabilities. Among these models, DINOv3 learns discriminative visual features from large-scale image data through self-supervised learning and can generate transferable representations for a wide range of downstream tasks. In this study, the classification performance of DINOv3 on imbalanced plant datasets was investigated. Experiments were conducted using the Pl@ntNet-300K-v2 dataset, which contains 306,087 color images belonging to 1,000 plant species and 111 plant families. In the first stage, feature representations were extracted from all images using DINOv3. The resulting feature vectors were then evaluated at both the species and family levels using artificial neural network and logistic regression classifiers. Unlike conventional deep learning approaches, this study assessed the discriminative power of DINOv3's pre-trained visual representations on imbalanced plant datasets rather than training models from scratch or fine-tuning them. At the family level, the artificial neural network achieved an accuracy of 97.95% and a macro F1-score of 82.45%, while logistic regression achieved an accuracy of 94.27% and a macro F1-score of 72.81%. At the species level, the artificial neural network reached an accuracy of 85.91% and a macro F1-score of 51.49%, whereas logistic regression obtained an accuracy of 71.63% and a macro F1-score of 41.26%. The results indicate that family-level classification is more successful than species-level classification. This finding suggests that the representations learned by DINOv3 effectively capture general taxonomic structures but encounter greater difficulty in distinguishing fine-grained inter-species differences. Error analysis revealed that most misclassifications occurred among morphologically similar species belonging to the same family. The obtained results demonstrate that DINOv3-based visual representations can achieve high accuracy and macro F1 performance on imbalanced plant datasets. In particular, the family-level results indicate that the model can successfully represent biologically meaningful taxonomic relationships despite severe class imbalance. These findings suggest that DINOv3 representations, when used as fixed feature extractors without fine-tuning, can serve as an effective solution for biological classification tasks and hold significant potential for real-world scenarios involving species with limited training samples.

Keywords: Plant Classification, Class Imbalance, Foundation Models

**AMASYA MİSKET ELMASI ÜRETİM VE PAZARLAMA YAPISI: NİĞDE İLİ ÇAMARDI
İLÇESİ ÖRNEĞİ**

Bekir Sıtkı ŞİRİKÇİ

Dr. Öğr. Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, Yozgat, Türkiye.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4780-2129>
b.sitki.sirikci@yobu.edu.tr

Zehra Meliha TENGİZ

Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, Yozgat, Türkiye.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0831-7091>
z.meliha.tengiz@yobu.edu.tr

Mesut ONGUN

Ziraat Mühendisi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tarım Ekonomisi ABD.,
Yozgat, Türkiye.
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7894-3721>

ÖZET

Bu çalışma, Niğde ili Çamardı ilçesinde Amasya misket elması üretimi yapan tarım işletmelerinin sosyo-demografik yapısını, üretim tekniklerini ve pazarlama koşullarını kapsamlı biçimde incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, farklı arazi büyüklük gruplarına göre tabakalı örnekleme yöntemiyle belirlenen 74 işletme ile yüz yüze anket tekniği kullanılarak birincil veriler toplanmış; işletmeler dikili alan büyüklüklerine göre I., II. ve III. grup olarak sınıflandırılmıştır. Bulgular; işletmecilerin ortalama yaşının 51.64, Amasya misket elması üretim deneyiminin ise 27,82 yıl olduğunu ortaya koymaktadır. Üreticilerin eğitim düzeyi görece düşük olup %94,59'u konvansiyonel üretim yöntemini sürdürmekte, yalnızca %5.41'i iyi tarım uygulamalarını benimsemektedir. İşletmelerin %87,84'ü üretim kaydı tutmamakta, %74.32'si toprak analizine dayalı gübreleme yapmamakta ve %85.14'ü önerilen ilaç dozunu aşarak uygulamaktadır. Tarım sigortası yaptırma oranının yalnızca %17.57 düzeyinde kaldığı ve işletmelerin iklim kaynaklı başta olmak üzere ekonomik risklere karşı yeterince korunmadığı saptanmıştır. Pazarlama boyutunda ise üreticilerin %97.30'u ürününü hasat sonrası bekletmeksizin satmakta; bölgede soğuk hava deposu bulunmaması nedeniyle fiyat belirleme sürecinde tüccarlar karşısında pazarlık gücünden yoksun kalmaktadır. İşletmelerin tam olarak yarısı (%50.00) pazarlama sorunu yaşadığını ifade etmiş; depolama altyapısının yetersizliği, tüccarların yüksek fire uygulaması ve ürün bazlı pazarlama kooperatifinin bulunmaması başlıca sorunlar olarak öne çıkmıştır. Bu bulgular doğrultusunda; iyi tarım uygulamalarının teşvik edilmesi, bölgeye modern soğuk hava deposu kurulması, Amasya misket elmasına özgü bir pazarlama kooperatifinin oluşturulması, tarım sigortası bilincinin artırılması ve üreticilerin dijital kayıt sistemlerine entegrasyonunun desteklenmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Amasya misket elması, tarımsal pazarlama, üretim yapısı, Çamardı, iyi tarım uygulamaları

**PRODUCTION AND MARKETING STRUCTURE OF AMASYA MISKET APPLE: THE CASE
OF ÇAMARDI DISTRICT IN NİĞDE PROVINCE**

ABSTRACT

This study aimed to comprehensively examine the socio-demographic characteristics, production practices, and marketing conditions of agricultural enterprises producing Amasya Misket apples in the Çamardı district of Niğde Province. Primary data were collected through face-to-face surveys conducted with 74 farms selected using a stratified sampling method based on different land-size groups. The surveyed farms were classified into Groups I, II, and III according to their orchard sizes. The findings revealed that the average age of farm operators was 51.64 years, while the average experience in Amasya Misket apple production was determined to be 27.82 years. The educational level of producers was found to be relatively low. Conventional production methods were practiced by 94.59% of the producers, whereas only 5.41% had adopted Good Agricultural Practices. Production records were not maintained by 87.84% of the farms, soil analysis-based fertilization was not performed by 74.32%, and pesticide applications exceeding the recommended dosage were carried out by 85.14% of the producers. The rate of agricultural insurance adoption was found to be only 17.57%, indicating that farms were not adequately protected against economic risks, particularly those associated with climatic conditions. With regard to marketing, 97.30% of the producers were found to sell their products immediately after harvest without any storage period. Due to the absence of cold storage facilities in the region, producers were deprived of bargaining power against traders during the price determination process. Exactly half of the surveyed farms (50.00%) reported experiencing marketing-related problems. Insufficient storage infrastructure, high product loss deductions imposed by traders, and the absence of a product-specific marketing cooperative were identified as the major constraints affecting marketing activities. Based on these findings, the promotion of Good Agricultural Practices was recommended, along with the establishment of modern cold storage facilities in the region, the formation of a marketing cooperative specifically for Amasya Misket apples, the enhancement of awareness regarding agricultural insurance, and the support of producers' integration into digital record-keeping systems.

Keywords: Amasya Misket apple, agricultural marketing, production structure, Çamardı, Good Agricultural Practices (GAP)

The authors would like to thank TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Türkiye) for their financial support through the projects of TUBITAK 2209-A (A program for university students at the undergraduate level).

UHT SÜT ÜRETİMİNDE FARKLI STERİLİZASYON YÖNTEMLERİNİN SON ÜRÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ali Baran DÖNMEZ

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-2688-3288>
alibarandonmez34@gmail.com

Hatice SIÇRAMAZ

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5943-9566>
haticesicramaz@sakarya.edu.tr

Ayşen CAN

Group Lactalis, AK Gıda San. Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Sakarya, Türkiye
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8440-8676>
aysen.can@tr.lactalis.com

ÖZET

Ultra yüksek sıcaklık (UHT) işlemi, uzun raf ömrüne sahip ticari steril süt üretiminde en yaygın kullanılan teknolojilerden biridir. Direkt ve indirekt UHT sistemleri benzer mikrobiyolojik güvenliğini sağlamakla birlikte, ısı transfer mekanizmalarındaki farklılıklar son ürünün kalite özelliklerini etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, direkt buhar enjeksiyonu ve indirekt UHT sterilizasyon yöntemleri ile üretilen sütlerin 90 günlük depolama süresince fizikokimyasal, yapısal ve duyu özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Süt örnekleri endüstriyel üretim koşullarında direkt ve indirekt UHT sistemleri kullanılarak üretilmiştir. Depolama süresince pH ve renk analizleri ile fizikokimyasal özellikler, FTIR ve UV-Vis spektrofotometrik analizlerle yapısal değişimler değerlendirilmiş, ayrıca duyu analizler gerçekleştirilmiştir. Her iki sterilizasyon yöntemiyle üretilen sütlerin kimyasal kompozisyonlarının benzer olduğu ve depolama boyunca pH değerlerinde yalnızca sınırlı değişimler meydana geldiği belirlenmiştir. FTIR analizlerinde Amid I ve Amid II bölgelerinde belirgin pik kayması gözlenmemiş, her iki yöntemin de süt proteinlerinin sekonder yapısını büyük ölçüde koruduğu görülmüştür. UV-Vis analizlerinde ise 294 ve 420 nm’de elde edilen absorbans değerleri bakımından iki yöntem benzer eğilim göstermiştir. En belirgin farklılıklar duyu analizlerde ortaya çıkmıştır. İndirekt UHT sütlerinde depolama süresince tat ve koku puanlarında anlamlı azalmalar gözlenirken, direkt UHT sütleri duyu özelliklerini daha kararlı şekilde korumuştur. Ayrıca depolamanın ilerleyen dönemlerinde direkt UHT sütlerinin koku ve renk beğeni puanlarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir (P<0,05). Sonuç olarak, her iki UHT yöntemi de sütün fizikokimyasal ve yapısal özelliklerini başarıyla korumuştur. Bununla birlikte, direkt UHT (buhar enjeksiyonu) yöntemi depolama süresince duyu kaliteyi daha iyi muhafaza etmiş ve tüketici kabulü açısından daha avantajlı bir üretim yöntemi olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında **1139B412400574** numaralı proje ile desteklenmiş olup, desteklerinden dolayı TÜBİTAK’a teşekkürlerimizi sunarız.

Anahtar Kelimeler: UHT süt, direkt buhar enjeksiyonu, indirekt UHT, FTIR, UV-Vis spektrofotometre, duyu analiz

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT STERILIZATION METHODS ON THE
FINAL PRODUCT IN UHT MILK PRODUCTION**

ABSTRACT

Ultra-high temperature (UHT) processing is one of the most widely used technologies for producing commercially sterile milk with extended shelf life. Although direct and indirect UHT systems provide comparable microbiological safety, differences in heat transfer mechanisms may influence the quality characteristics of the final product. This study aimed to compare the effects of direct steam injection and indirect UHT sterilization on the physicochemical, structural, and sensory properties of milk during 90 days of storage. Milk samples were produced under industrial conditions using direct and indirect UHT systems. Physicochemical analyses (pH and color), instrumental analyses (FTIR and UV–Vis spectroscopy), and sensory evaluations were performed during storage. Both sterilization methods produced milk with similar chemical composition and only minor changes in pH throughout storage. FTIR spectra showed no noticeable shifts in the amide I and amide II regions, indicating that the secondary structure of milk proteins was largely preserved regardless of the sterilization method. UV–Vis measurements at 294 and 420 nm exhibited comparable absorbance profiles for both processing methods during storage. Sensory analysis revealed the most pronounced differences between the treatments. While indirect UHT milk showed significant decreases in taste and aroma scores during storage, direct UHT milk maintained more stable sensory characteristics. In addition, direct UHT samples received significantly higher aroma and color scores at the later stages of storage ($P < 0.05$). Overall, both UHT systems effectively preserved the physicochemical and structural properties of milk. However, direct UHT processing provided superior preservation of sensory quality during storage, suggesting that this method may offer advantages in maintaining consumer acceptability throughout shelf life. This study was supported by the TÜBİTAK 2209-B Industry-Oriented Undergraduate Research Projects Support Programme under Project No. **1139B412400574**. The authors gratefully acknowledge TÜBİTAK for its financial support.

Keywords: UHT milk; direct steam injection; indirect UHT; FTIR; UV–Vis spectroscopy; sensory analysis.

**MODIFICATION OF SILICON NITRIDE PARTICLE SURFACES OF DIFFERENT SIZES
WITH A CALCIUM PHOSPHATE LAYER**

Müh. Sueda Eslem Kurt (ORCID: 0009-0000-4232-5098)

Sakarya University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Science Engineering Department,
Thermal Spray R&D Laboratory, Sakarya, Türkiye
Email: suedakurt2002@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-4232-5098>

Dr. Öğr. Üye. Fatih Erdem Baştan (ORCID: 0000-0002-9224-7742)

Sakarya University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Science Engineering Department,
Thermal Spray R&D Laboratory, Sakarya, Türkiye
Email: febastan@sakarya.edu.tr
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9224-7742>

Özet

Bu çalışmada, üstün mekanik özellikleri ve biyouyumluluğu ile öne çıkan silikon nitrid (Si_3N_4) partiküllerinin biyolojik performansının artırılması amacıyla, yüksek biyoaktiviteye sahip hidroksiapatit (HAp) ile kaplanması araştırılmıştır. Bu kapsamda, HAp kristalleri Si_3N_4 partiküllerinin yüzeyine ıslak kimyasal çöktürme yöntemi ile biriktirilmiştir. Ayrıca, Si_3N_4 partikül boyutunun faz oluşumu ve mikroyapısal gelişim üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla nano boyutlu (nSN) ve mikron altı (mSN) tozlar kullanılmıştır. Yüzey modifikasyonu uygulanan tozlar farklı sıcaklıklarda kalsine edilerek faz stabilitesi, yüzey morfolojisi, termal davranışları vb. özellikleri incelenmiştir. Mikroskobik analizler, mSN partiküllerinin nSN'ye göre daha homojen bir şekilde kaplandığını göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda HAp fazının trikalsiyum fosfat (TCP) fazına dekompoze olduğu tespit edilmiştir. SN fazı 1400 °C'de de stabilitesini korumuştur, fakat yüzeyindeki kalsiyum fosfat fazı bozunarak kalsiyum silikat fazına dönüşmüştür. İlerideki çalışmalarda modifiye edilen tozların sinterlenerek yüksek yoğunluklu SN esaslı biyoaktif bir malzemenin üretilmesi amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyomalzemeler, Silikon nitrid, hidroksiapatit

Abstract

In this study, surface coating of a highly bioactive hydroxyapatite (HAp) layer on the silicon nitride (Si_3N_4) was investigated to enhance the biological performance of silicon nitride (Si_3N_4 , SN), which presents superior mechanical properties and biocompatibility. In this context, HAp particles were deposited on the SN particles using wet chemical precipitation. Additionally, the effects of SN particle size on the phase stability and microstructure were analyzed by using nano-sized (nSN) and submicron (mSN) particles. The surface-modified SN particles were calcined at various temperatures to investigate high-temperature stability, surface morphology, thermal behavior, and related properties. Microscopical analyses showed that mSN particles were homogenously coated by the HAp layer compared to the nSN surfaces. It was determined that the HAp phase decomposed to tricalcium phosphate (TCP) at elevated temperature. Although SN sustained its phase structure up to 1400 °C, the calcium phosphate phase on the SN surface converted into the calcium silicate phase. Future studies will focus on producing high-density SN-based bioactive materials by sintering the modified particles.

Keywords: Biomaterials, Silicon nitride, hydroxyapatite

ONE-STAGE LAPAROSCOPIC MANAGEMENT OF GALLBLADDER AND COMMON BILE DUCT STONES

Drini Shehi

University Hospital Centre “Mother Teresa”, Tirana. Albania

Edmont Çeliku

University Hospital Centre “Mother Teresa”, Tirana. Albania

Abstract

Concomitant gallbladder and common bile duct stones represent a frequent clinical problem requiring effective treatment of both cholecystolithiasis and choledocholithiasis. Traditionally, management has involved a two-stage approach combining endoscopic retrograde cholangiopancreatography and laparoscopic cholecystectomy. However, one-stage minimally invasive treatment using laparoscopic exploration of the extrahepatic bile ducts offers a definitive alternative. To evaluate the role of one-stage minimally invasive treatment of gallbladder and common bile duct stones through laparoscopic cholecystectomy combined with laparoscopic exploration of the extrahepatic bile ducts using choledochoscopy. This approach involves laparoscopic cholecystectomy followed by intraoperative exploration of the common bile duct, either through the cystic duct or by choledochotomy, depending on stone size, number, duct diameter, and anatomical conditions. Choledochoscopy allows direct visualization of the biliary tree, confirmation of stone extraction, assessment of duct clearance, and reduction of residual lithiasis. One-stage laparoscopic treatment provides simultaneous resolution of gallbladder and bile duct stones, avoiding repeated anesthesia, reducing hospital stay, and limiting the need for additional endoscopic procedures. Direct choledochoscopic control improves the safety and accuracy of common bile duct clearance. This technique is particularly valuable in selected patients with confirmed choledocholithiasis, dilated common bile duct, multiple stones, or failed/precluded endoscopic access. Laparoscopic exploration of the extrahepatic bile ducts with choledochoscopy is an effective and safe minimally invasive option for the one-stage treatment of gallbladder and common bile duct stones. When performed by experienced surgical teams, it may reduce treatment fragmentation, improve duct clearance, and offer a complete therapeutic solution during a single operative session.

Keywords: Cholelithiasis; Choledocholithiasis; Laparoscopic bile duct exploration; Choledochoscopy.

TENOFOVIR THERAPY IN HEPATITIS B-RELATED LIVER CIRRHOSIS

Kristi Trako

University Hospital Centre “Mother Teresa”, Tirana. Albania

Ilir Bibolli

University Hospital Centre “Mother Teresa”, Tirana. Albania

Jovan Basho

University Hospital Centre “Mother Teresa”, Tirana. Albania

Abstract

Chronic hepatitis B virus infection remains an important cause of liver cirrhosis and its complications. Long-term antiviral therapy with tenofovir has become a key therapeutic strategy for suppressing viral replication, stabilizing liver disease, and reducing the risk of clinical progression in patients with hepatitis B-related cirrhosis. To evaluate the clinical, biochemical, and virological course of treatment with tenofovir in patients with compensated and decompensated liver cirrhosis caused by chronic hepatitis B infection. This study assessed patients diagnosed with hepatitis B-related liver cirrhosis who received tenofovir therapy and were followed over time. Patients were classified according to the stage of cirrhosis as compensated or decompensated. Evaluation included demographic and clinical characteristics, liver function parameters, viral load response, Child–Pugh class, MELD score where available, and the occurrence of cirrhosis-related complications. Treatment response was assessed through changes in HBV DNA levels, alanine aminotransferase values, bilirubin, albumin, prothrombin time or INR, platelet count, and clinical stability during follow-up. Tenofovir treatment was associated with effective suppression of HBV replication and improvement or stabilization of biochemical liver parameters in most patients. Patients with compensated cirrhosis generally demonstrated better clinical stability and lower progression rates, while those with decompensated cirrhosis showed variable improvement depending on baseline liver reserve and severity of complications. Viral suppression was accompanied by reduced inflammatory activity and, in several cases, improvement in Child–Pugh status. No major treatment-limiting adverse effects were observed. Tenofovir represents an effective and well-tolerated antiviral therapy in patients with hepatitis B-related liver cirrhosis, contributing to viral suppression, biochemical improvement, and clinical stabilization. Its benefits are more pronounced in compensated cirrhosis, although selected patients with decompensated disease may also experience meaningful improvement under careful monitoring.

Keywords: Hepatitis B; Tenofovir; Liver cirrhosis; Decompensated cirrhosis.

SINONASAL DISEASE WITH ORBITAL EXTENSION

Tedi Minarolli

University Hospital Center “Mother Theresa,” Tirana, Albania

Birkena Qirjazi

University Hospital Center “Mother Theresa,” Tirana, Albania

Abstract

Orbital extension is an important complication of acute rhinosinusitis and may lead to visual impairment, intracranial spread and severe systemic outcomes if not recognized early. Although most cases remain limited to the sinonasal cavities, infection may spread to the orbit through the lamina papyracea or ethmoid sinuses. Orbital complications have been reported in about 5.8% of hospitalized patients with rhinosinusitis. This study aimed to describe the clinical presentation, diagnostic evaluation and management of patients with rhinosinusitis-related orbital involvement treated in the Otorhinolaryngology Service of University Hospital Center “Mother Teresa”, Tirana. A descriptive clinical study was conducted among patients evaluated for suspected orbital complications secondary to rhinosinusitis. Data included demographic characteristics, presenting symptoms, imaging findings, type of orbital involvement, treatment modality, need for surgical intervention and clinical outcome. The study included 36 patients with orbital complications secondary to rhinosinusitis. Children and adolescents represented approximately 72.2% of cases. The most common manifestations were eyelid swelling, periorbital erythema, fever, ocular pain, headache and nasal obstruction or discharge. Severe cases presented with proptosis, restricted ocular movements, diplopia or reduced visual acuity. Preseptal cellulitis was the most frequent complication, accounting for 72.2% of cases, followed by orbital cellulitis in 22.2% and orbital abscess in 5.6%. Contrast-enhanced computed tomography was the main imaging modality used to assess sinonasal disease, orbital extension and possible abscess formation. All patients received systemic antibiotic therapy, while surgical drainage was indicated in selected cases with abscess formation, visual compromise, intracranial extension or poor response to medical treatment. Rhinosinusitis-related orbital involvement requires early recognition, urgent imaging and coordinated otorhinolaryngologic and ophthalmologic management to prevent visual loss and severe complications.

Keywords: rhinosinusitis; sinonasal disease; orbital extension; orbital cellulitis; otorhinolaryngology; QSUT.

ESTABLISHMENT OF LYMPHOBLASTOID CELL LINES FROM SPINAL MUSCULAR ATROPHY (SMA) PATIENTS: A BIOBANK RESOURCE FOR GENETIC STUDIES AND THERAPEUTIC DEVELOPMENT

Samaneh Mahmood-Aghdam

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Mina Gholami

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Alireza Ahmadi

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Hedieh Rahmati

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Mehrnaz Izadpanah

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Abdolreza Daneshvar Amoli*

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran
abdolrezadaneshvar@yahoo.com

Mansoureh Farhangniya

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Shiva Mohammadi

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Mohammad Hossein Sanati

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Zahra Elyasi Gorgi

Human and Animal Cell Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR), Tehran, Iran

Abstract

Spinal Muscular Atrophy (SMA) is a rare autosomal recessive neuromuscular disorder caused by homozygous deletions or mutations in the SMN1 gene, leading to progressive degeneration of spinal motor neurons. Given the scarcity of high-quality biospecimens from genetically confirmed SMA patients,

establishing a stable and renewable cellular biobank is essential for advancing translational research, particularly in the era of emerging gene-targeted therapies. Peripheral blood samples were obtained from 5 genetically confirmed SMA patients (with homozygous SMN1 exon 7 deletion) following written informed consent. Lymphocytes were isolated using Ficoll-Paque density gradient centrifugation and subsequently transformed with Epstein–Barr virus (EBV) derived from the B95-8 cell line in the presence of cyclosporine A to generate stable lymphoblastoid cell lines (LCLs). The established LCLs were expanded, characterized (including confirmation of the SMN1 deletion genotype), and cryopreserved. Quality control assessments included mycoplasma detection (via PCR and culture methods), sterility testing for bacterial and fungal contamination, species verification (human origin PCR), and comprehensive screening for blood-borne pathogens including HBV, HCV, and HIV. All five LCLs were successfully established and expanded. Each cell line tested negative for mycoplasma, bacterial, and fungal contamination. Species verification confirmed human origin, and all viral screening assays for blood-borne pathogens returned negative results. The cryopreserved LCLs were systematically catalogued and stored in the vapor phase of liquid nitrogen. These LCLs serve as a renewable and valuable platform for SMA research, providing unlimited access to high-quality genomic DNA, RNA, and protein derivatives. This resource facilitates a wide range of downstream applications, including genetic association studies, exon-skipping and splice-modulation assays, epigenetic analyses, and functional genomics investigations aimed at understanding SMN2 regulation and developing novel therapeutic strategies. All established cell lines are available through the Iranian Biological Resource Centre for distribution to qualified researchers. (<https://ibrc.ir/>).

Keywords: SMA, Biobank, lymphoblastoid cell lines, EBV-transformation

DATA CAPITALIZATION ON *Thymus maroccanus*: PHYTOCHEMICAL COMPOSITION, ANTICANDIDAL ACTIVITY, AND SYNERGISTIC POTENTIAL WITH CONVENTIONAL ANTIFUNGALS

Fatima-ezzahra Jaayefar*

Laboratory of Botany, Biotechnology and Plant Protection, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

Jamila Dahmani

Laboratory of Botany, Biotechnology and Plant Protection, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

Abstract

Thymus maroccanus, a Moroccan endemic medicinal plant from the Lamiaceae family, represents a promising source of bioactive compounds with significant antifungal properties. This study aims to systematically review and capitalize on reliable published data concerning the phytochemical composition, anticandidal activity, and synergistic potential of *T. maroccanus* essential oil (EO) when combined with conventional antifungal drugs. According to published studies, the essential oil of *T. maroccanus* is characterized by a high content of phenolic monoterpenes, with carvacrol (89.15%) being the predominant compound, followed by minor constituents including linalol (2.15%), thymol (1.87%), trans-caryophyllene (1.27%), β -bisabolene (0.99%), and borneol (0.94%). This rich chemical composition underpins significant anticandidal activity against *Candida albicans*, with a minimum inhibitory concentration (MIC) of 0.25 mg/ml and an inhibition zone of 44.5 ± 0.35 mm. Critically, the checkerboard titer assay revealed remarkable synergistic effects when *T. maroccanus* EO was combined with conventional antifungal drugs. The fractional inhibitory concentration indices (FICI) were 0.49 for the combination with amphotericin B and 0.27 for the combination with fluconazole, both indicating strong synergism ($FICI \leq 0.5$). The combination with fluconazole demonstrated stronger synergy, reducing the MIC of fluconazole from 16 μ g/ml to 0.5 μ g/ml (32-fold reduction). *Thymus maroccanus* thus emerges as a valuable source of natural bioactive compounds with potent anticandidal activity. The synergistic effect observed with conventional antifungal drugs suggests a promising strategy for reducing the minimum effective dose of these drugs, thereby minimizing their toxic side effects and treatment costs while potentially overcoming fungal resistance mechanisms. These findings provide a scientific basis for the traditional use of Moroccan thyme and highlight the potential for developing novel combination therapies for the treatment of candidiasis. Further research is warranted, including *in vivo* studies, toxicity evaluations, and mechanistic investigations to validate the therapeutic potential of these combinations.

Keywords: *Thymus maroccanus*, Lamiaceae, essential oil, carvacrol, anticandidal, synergism, *Candida albicans*, amphotericin B, fluconazole, phytochemicals

DATA CAPITALIZATION ON *Leontodon saxatilis*: ECOTYPIC DIFFERENTIATION AND PHENOTYPIC PLASTICITY AS DRIVERS OF INVASIVENESS

Fatima-ezzahra Jaayefar*

Laboratory of Botany, Biotechnology and Plant Protection, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

Fatima El hilah

Laboratory of Botany, Biotechnology and Plant Protection, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

Jamila Dahmani

Laboratory of Botany, Biotechnology and Plant Protection, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

Abstract

Leontodon saxatilis subsp. *rothii* (Asteraceae), the most widespread alien plant species in Chile, represents a compelling case study for understanding mechanisms underlying successful biological invasions. Native to the Mediterranean Basin, this daisy has become widely naturalized across central Chile since its first record in 1963, exhibiting rapid range expansion from 32°S to 42°S. This study aims to systematically review and capitalize on reliable published data concerning ecological and evolutionary strategies that enhance the invasiveness of *L. saxatilis*, with emphasis on reproductive traits, dispersal mechanisms, and the interplay between phenotypic plasticity and ecotypic differentiation. According to published studies, *L. saxatilis* displays a unique combination of traits facilitating invasive success. The species produces dimorphic fruits within a single flower head: peripheral fruits lacking dispersal structures (self-replacement strategy) and central wind-dispersed fruits (long-distance dispersal strategy). Common garden reciprocal transplant experiments between native (Spain) and invasive (Chile) ranges revealed that planting site had the largest effect on plant biomass, with individuals grown in Chile exhibiting significantly greater above-ground biomass (mean 25.8 g vs. 6.7 g in Spain). Reproductive investment traits were consistently higher in the invasive range, demonstrating strong phenotypic plasticity. Critically, the proportion of wind-dispersed central fruits was significantly greater in Chilean populations (0.87 ± 0.003 SE) compared to Spanish populations (0.80 ± 0.006 SE), indicating ecotypic differentiation and suggesting selection for enhanced dispersal ability during invasion. *Leontodon saxatilis* thus emerges as a species combining multiple strategies to enhance invasiveness: (1) strong phenotypic plasticity in growth and reproductive investment; (2) ecotypic differentiation for increased production of wind-dispersed fruits; and (3) a bet-hedging strategy through fruit dimorphism. These findings underscore the importance of comparing invasive plant performance across native and invasive ranges. Given that Asteraceae species with fruit dimorphisms represent a substantial proportion of invasive plants worldwide, this study provides critical insights for predicting invasiveness and developing targeted management strategies.

Keywords: *Leontodon saxatilis*, Asteraceae, heterocarpy, phenotypic plasticity, ecotypic differentiation, biological invasions, seed dispersal, fruit dimorphism

**AN OVERVIEW OF THE STRENGTH AND DURABILITY PROPERTIES OF TIMBER IN
MARINE ENVIRONMENT**

Muhammad ASLAM

Department of Civil Engineering, School of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of
Technology, Wenzhou 325000, Zhejiang, China
maslam@wzut.edu.cn
ORCID NO: 0000-0002-4126-0453

Payam SHAFIGH

Department of Civil Engineering, School of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of
Technology, Wenzhou 325000, Zhejiang, China
Centre for Building, Construction & Tropical Architecture (BuCTA), Faculty of Built Environment,
Universiti Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia
pshafigh@gmail.com
ORCID NO: 0000-0002-8576-3984

Azlan SHAH ALI

Faculty of Built Environment, Universiti Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia
asafab@um.edu.my
ORCID NO: <https://orcid.org/0000-0003-1923-7473>

Yilang LIU

Department of Civil Engineering, School of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of
Technology, Wenzhou 325000, Zhejiang, China
liuyilang@wzut.edu.cn

ABSTRACT

Marine structures are type of special structures whose requirements may not be similar to those of conventional structures. In these structures, the main concerns are durability, resistance to sulphates and chlorides, permeability requirements and the long-term performance under exposed environmental conditions. Natural timber is a type of material that can be used for sustainable approaches including applications in marine structures. Timber was extensively used for the construction of marine structures such as bridges and jetties, piers, lock-gates, groynes, revetments and shoreline stabilization structures. One of the major concerns of using timber in the marine environment is its durability and service life. Therefore, timber elements must be designed with a suitable type of wood considering their properties and working characteristics. Both types of softwood and hardwood are suitable for marine and freshwater structures. Softwoods include douglas fir, larch, pine, pitch, and hemlock western, and hardwoods include belian, dahoma, danta, ekki, oak, meranti, teak, tali, elm, and green heart. There are technical criteria for woods for being qualified for marine structures. For example, the green density (at 30% moisture content) of softwood should be in the range of 590 to 970 kg/m³ and for hardwood it should be within the range of 605 to 1360 kg/m³. In addition, understanding the differences of durability properties of soft and hard woods are important in designing and selection of timber materials for marine environment. For example, it should be considered that softwoods are moderately-resistant to resistant while hardwoods are resistant to extremely-resistant to wood preservative penetration. While, resistance of softwoods against decay is ranging from non-durable to moderately durable, this ranges from non-durable to very durable for hardwoods. This research is an overview of recent findings on the strength characteristics and durability of marine-grade timbers.

Keywords: Timber, Marine Structures, Properties, Sustainable Approaches, Permeability, Decay, Durability.

**FROM MODEL-CENTRIC TO DATA-CENTRIC AI: A SYSTEMATIC REVIEW AND
FRAMEWORK FOR CUSTOMER BEHAVIOR PREDICTION IN TELECOM**

Frida Zisko

Faculty of Informatics, Mediterranean University of Albania, Tirana, Albania
frida.zisko@umsh.edu.al

Abstract

Customer behavior prediction in telecommunications is commonly approached as a model-selection problem in which increasingly complex algorithms are compared on fixed benchmark datasets. This model-centric orientation can obscure upstream data problems that determine whether a predictive system is valid, reproducible, and maintainable. This paper presents a focused systematic review of data-centric artificial intelligence and telecom customer churn research and proposes D-CAT, a Data-Centric Customer Analytics for Telecom framework. The review synthesizes evidence across target definition, data acquisition, data quality, label engineering, leakage-safe preprocessing, temporal feature construction, validation design, documentation, and post-deployment monitoring. The analysis identifies recurring weaknesses: ambiguous churn labels, weak reporting of observation and prediction windows, inconsistent handling of missing and imbalanced data, limited tests for label noise and leakage, dependence on static public datasets, and insufficient attention to drift, provenance, and data maintenance. D-CAT organizes the analytics lifecycle into six connected layers—target semantics, data acquisition, quality and labeling, preparation and feature engineering, validation and modeling, and monitoring and renewal—supported by cross-cutting governance and reproducibility controls. A configurable Data-Centric Readiness Score and a minimum reporting checklist are introduced to operationalize the framework. The paper argues that progress in telecom customer analytics should be assessed not only by marginal improvements in predictive metrics, but also by the reliability, representativeness, traceability, and temporal validity of the data pipeline.

Keywords: customer behavior prediction; customer churn; data-centric AI; data quality; telecom; machine learning; MLOps; systematic review

SCREENING EMS-INDUCED SESAME (*Sesamum indicum* L.) MUTANTS FOR LOW-TEMPERATURE TOLERANCE AT GERMINATION

Tahri Nouhayla

Functional Ecology and Environment Engineering Laboratory, Faculty of Science and Technology, Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Fez, Morocco

Research Unit of Plant Breeding and Plant Genetic Resources Conservation, National Institute of Agricultural Research, Regional Agricultural Research Center of Meknes, Meknes, Morocco

Mikou Karima

Functional Ecology and Environment Engineering Laboratory, Faculty of Science and Technology, Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Fez, Morocco

Nabloussi Abdelghani*

Research Unit of Plant Breeding and Plant Genetic Resources Conservation, National Institute of Agricultural Research, Regional Agricultural Research Center of Meknes, Meknes, Morocco

Abstract

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is a valuable oilseed crop in Morocco, but its cultivation is severely constrained by its sensitivity to low temperatures during germination and early seedling establishment. Traditionally sown in June, advancing the sowing date to April could enable the crop to benefit from residual spring rainfall, thereby reducing irrigation requirements and enhancing productivity. However, earlier sowing exposes germinating seeds to suboptimal soil temperatures, with night minima ranging from 10 to 15 °C. Induced mutagenesis using ethyl methanesulfonate (EMS) provides an effective strategy for generating novel genetic variability and improving tolerance to abiotic stresses. This study aimed to identify EMS-induced sesame mutant lines with enhanced tolerance to low-temperature stress by evaluating germination and early seedling growth under progressively cooler temperature regimes. Germination and seedling growth traits were assessed under controlled *in vitro* conditions. Low-temperature stress induced highly significant genotypic variation ($p < 0.001$) for all evaluated traits, except root length and plumule length. Under the coldest temperature regime (24 °C/12 °C), mutants ML2-37 and ML2-72 maintained significantly higher germination percentages than the cold-sensitive mutant US1-2. These tolerant mutants also exhibited faster germination, shorter mean germination time, higher root-to-shoot ratios, and greater seedling vigor indices. Among the evaluated genotypes, ML2-37 displayed the highest overall tolerance, closely followed by ML2-72. These promising mutant lines represent valuable genetic resources for the development of climate-resilient sesame cultivars adapted to early spring sowing. Nevertheless, because this study was conducted exclusively under controlled laboratory conditions, further validation through multi-location and multi-season field trials is required to confirm the agronomic performance, cold tolerance, and yield stability of these mutants under actual early-spring sowing conditions.

Keywords: *Sesamum indicum* L.; low-temperature stress; EMS mutagenesis; germination; seedling vigor

**ANTIBACTERIAL ACTIVITY OF DRYOPTERIS FERN-CAPED SILVER NANOPARTICLES
AGAINST *S. aureus* and *E. Coli***

Emmanuel Tomisin Bello^{1*}

Thomas Adewumi University, Oko, Kwara State, Nigeria
emmanuelbello508@gmail.com

Majekodunmi Rachael Adedayo

Kwara State University, Malete, Nigeria

Abstract

Nanotechnology has emerged as a vital field, particularly in synthesizing nanoparticles. Silver nanoparticles (AgNPs) are recognized for their strong antimicrobial properties against various pathogens, including *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*, due to their small size and high surface area. Green synthesis using plant extracts offers an eco-friendly alternative. The rise of multidrug-resistant bacteria underscores the urgent need for new antimicrobial agents. This study investigates the antibacterial activities of *Dryopteris cristata* AgNPs (DC-AgNPs) against *S. aureus* and *E. coli*, employing antimicrobial susceptibility testing (AST), minimum inhibitory concentration (MIC), and minimum bactericidal concentration (MBC) assessments, along with nanoparticle characterization. The antimicrobial activity of DC-AgNPs was evaluated using clinical isolates of *E. coli* and *S. aureus*. Bacterial inoculums were standardized to 0.5 MacFarland (1.5×10^8 CFU/mL) and tested via a modified agar-well diffusion method. The MIC and MBC were determined using broth microdilution and sub-culturing methods, respectively. Characterization of the nanoparticles was conducted using Ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and scanning electron microscopy (SEM). *D. cristata* was identified as the plant used to synthesize AgNPs, confirmed by the University of Ilorin, Nigeria. Phytochemical screening revealed the presence of tannins, flavonoids, glycosides, and phenolics. The AgNPs were synthesized by adding the aqueous extract to silver nitrate, resulting in a color change. Characterization via UV-Vis spectrophotometry confirmed nanoparticle formation. Antimicrobial testing showed that DC-AgNPs effectively inhibited *S. aureus* and *E. coli*, with minimum inhibitory concentrations of 125 µg and 250 µg, respectively, indicating their potential as antimicrobial agents.

Keywords: antimicrobial resistance, *dryopteris cristata*, *escherichia coli*, microbial pathogens, nanotechnology, phytochemicals, *staphylococcus aureus*

**SIMULATION OF FLUID FLOW WITH FREE SURFACES USING LIE ADVECTION AND
IMPLICIT FUNCTIONS**

Dimitrije Radjenović

Faculty of Mathematics, University of Belgrade, Studentski trg 16, 11000 Belgrade, Serbia

Abstract

Traditional semi-Lagrangian advection of velocity fields in fluid simulations introduces significant numerical diffusion, violating Kelvin's circulation theorem and causing vortices to degrade over time. This paper presents a geometrically consistent, covector approach for simulating incompressible fluids with free surfaces. Instead of treating velocity as a standard vector field, we formulate it as a differential 1-form advected via the Lie derivative. This structural preservation inherently eliminates the primary sources of numerical vorticity dissipation. To handle the phase boundary, we integrate the Level Set Method with periodic reinitialization using the Fast Marching Method. We developed a fully 3D C++ solver utilizing a staggered MAC grid, Conjugate Gradient pressure projection, and OpenMP parallelization. To the best of our knowledge, this represents the first Eulerian-based implementation of the covector formalism for free-surface flows. The solver is validated against standard benchmarks, including the Taylor-Green vortex, toroidal and poloidal vortex rings, a falling water sphere, and interacting fluid jets. The results demonstrate that the covector approach ensures superior preservation of coherent vortex structures and long-term physical fidelity compared to traditional vector-based advection, making it highly suitable for demanding applications in computer graphics.

Keywords: Lie derivative, Level set method, Fast Marching Method, numerical simulation.

PARENTS' BMI VS. CHILD'S BMI: RESULTS OF THE POLISH NATIONAL PROJECT „PHYSICAL EDUCATION WITH UNIVERSITY OF PHYSICAL EDUCATION” (PE WITH UPE)

Monika LOPUSZANSKA-DAWID

Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland,
Faculty of Physical Education, Department of Human Biology
monika.lopuszanska@awf.edu.pl
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3533-5754>

Paweł TOMASZEWSKI

Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland,
Faculty of Physical Education, Department of Tourism and Recreation
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8912-9991>

Katarzyna MILDE

Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland,
Faculty of Physical Education, Department of Human Biology
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0685-152X>

Patrycja WIDŁAK

Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland,
Faculty of Physical Education, Department of Human Biology
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3433-1310>

Janusz DOBOSZ

Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland,
Faculty of Physical Education, Department of Theory and Methodology of Physical Education
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2425-4932>

Bartosz MOLIŁ

Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland,
Faculty of Rehabilitation, Department of Movement Teaching
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6690-0699>

Abstract

Health-related lifestyle habits developed in childhood and early youth persist throughout life and guarantee a longer, healthier life, with parents appearing to serve as the primary role models for their children. Some research indicates an intergenerational transmission of health behavior models and, consequently, body mass index, although the scale of parental influence on children may vary depending on gender, the type of behavior, and family type. The aim was to determine the relationships between the levels of general adiposity (BMI: Body Mass Index) and physical activity of children and adolescents participating in the "PE with UPE" project and the BMI levels and physical activity levels of their parents. Data from over 20,000 parents of participants in additional free sports classes, the so-called "Sport Klubs" (aged 6-18 yrs), indicated that approximately 50% of the children's mothers and fathers had a higher education degree, and a further 30% had secondary education. The risk of excessive body weight among Polish children participating in the "WF z AWF" project depended on the excessive body weight of their parents, with this risk being even greater when both parents had excessive body weight (OR=1.50 - risk of a child's excessive body weight with one parent having excessive body weight; OR=3.28 - risk with both parents having excessive body weight, relative to parents with normal body weight). Physical inactivity of both parents led to a 66% increase in the risk of a child's physical inactivity. Among couples where both parents had excessive body weight, the risk of having an overweight or obese daughter increased by nearly 370%, and a son by 300%. Physically inactive parents raised the risk of a daughter's inactivity by approximately 87%, and a son's by 53%. Adverse health behavior patterns of the father mostly appear to have a stronger impact on children than those of the mother. The development of excessive body weight in childhood and its persistence into adulthood are mainly explained by the hereditary mechanisms of parental health behaviors, despite the modifying influence of the school and peer environment. There is a need to intensify educational activities, implement preventive programs that raise social health awareness in counteracting the negative effects of hypokinesia and preventing excessive body weight, and introduce intergenerational programs that physically activate children and their parents together.

Key words: WF z AWF, BMI, physical activity, socio-economic factors, Poland

Funding: The project was commissioned and financed by the Minister of Science and Higher Education in Poland (agreement no. MNiSW/2025/DAP/103 of 4 March 2025).

**FARKLI TANE RENGİNE SAHİP EKMEKLİK BUĞDAY (*Triticum aestivum* L.) GENOTİPLERİNDE
BAYRAK YAPRAK ALANININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Dudunur ERTARGIN

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bornova, İzmir

Fehmi KOZVEREN

Uluslararası Mısır ve Buğday Geliştirme Merkezi (CIMMYT), Ankara 06810, Türkiye.

Emrah KOÇ

Uluslararası Mısır ve Buğday Geliştirme Merkezi (CIMMYT), Ankara 06810, Türkiye.

Beyhan AKIN

Uluslararası Mısır ve Buğday Geliştirme Merkezi (CIMMYT), Ankara 06810, Türkiye.

Fatma AYKUT TONK

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bornova, İzmir.

Özet

Dünyada hızla artmakta olan nüfusa karşılık besin değeri yüksek, insan gıdası olan buğdaya yönelik talepte artmaktadır. Ekmeklik buğday (*Triticum aestivum* L.), dünya insan nüfusunun tahmini %35'i için temel bir üründür ve küresel gıda kalorilerinin beşte birini sağlamaktadır (Alomari et al.,2023). Renkli buğdaylar, fonksiyonel gıda bileşenleri (antosiyenin, fenolikler) açısından zengin olup hem insan sağlığı hem katma değeri yüksek ürün geliştirme potansiyeli taşımaktadır. Bu sebeple son yıllarda farklı tane rengine sahip buğday genotiplerinin agronomik özelliklerinin belirlenmesi bitki ıslahı çalışmaları açısından önem kazanmaktadır (Gamel et al., 2023). Buğday bitkisinde bayrak yaprağı, tane dolum döneminde fotosentez sağlanmasına önemli ölçüde katkı sağlaması ve tane gelişimi ile yakından ilişkili olmasından dolayı verim potansiyeli açısından değerlendirilmesinde dikkate alınan önemli bir morfolojik özellik olmaktadır. Bu sebeple bayrak yaprak alanının belirlenmesi, yüksek verimli genotiplerin seçimi ve buğday ıslah çalışmalarına katkı sağlaması açısından önemli bir ölçüm olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, farklı tane rengine sahip olan ekmeklik buğday genotiplerinde bayrak yaprak alanındaki dağılımın belirlenmesi amacıyla yürütülmüştür. Çalışmada, CIMMYT'ten temin edilen 26 farklı tane rengine sahip ekmeklik buğday genotipi materyal olarak kullanılmış, deneme Tesadüf Blokları Deneme Desenine göre üç tekerrürlü olarak kurulmuştur. Bütün genotipler 1 m'lik sıralara, sıra arası 30 cm, sıra üzeri 5 cm olacak şekilde elle ekilmiştir. Bayrak yaprak alanı, her bir genotipten bitkilerin bayrak yaprağı eni ve boyu ölçümlenerek çıkan değerlerin çarpımından elde edilen değer ile 0,68 kat sayısı ile tekrar çarpılarak elde edilmiştir (BYE * BYB * 0,68). İstatistiksel değerlendirmelerde SPSS paket programından yararlanılarak varyans analizi uygulanmış, genotip ortalamaları arasındaki farklar LSD çoklu karşılaştırma testiyle ortaya konulmuştur. Varyans analizi sonucunda bayrak yaprak alanı açısından genotipler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu belirlenmiştir ($P<0,001$). Genotiplerin ortalamaları incelendiği zaman en yüksek bayrak yaprak alanı 6 nolu genotipte 48,17 cm², en düşük bayrak yaprak alanı ise 3 nolu genotipte 23,82 cm² olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, farklı tane rengine sahip ekmeklik buğday genotipleri arasında bayrak yaprak alanı açısından önemli derecede genetik varyasyon bulunduğunu göstermektedir. Özelliklerinin alanının, genotiplerin agronomik özelliklerinin değerlendirilmesinde ve gelecekte buğday ıslah çalışmalarında yardımcı bir seçim kriteri olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar kelimeler: *Triticum aestivum* L., bayrak yaprak alanı, renkli buğday, agronomik özellik.

GEOMETRY-DRIVEN THERMODYNAMICS IN NANOSTRUCTURED MATERIALS

Marija Radmilović-Radjenović

Photonics Center, Institute of Physics, University of Belgrade, Pregrevica 118, 11080 Belgrade, Serbia

Branislav Radjenović

Photonics Center, Institute of Physics, University of Belgrade, Pregrevica 118, 11080 Belgrade, Serbia

Darko Vasiljević

Photonics Center, Institute of Physics, University of Belgrade, Pregrevica 118, 11080 Belgrade, Serbia

Bojana Bokić

Photonics Center, Institute of Physics, University of Belgrade, Pregrevica 118, 11080 Belgrade, Serbia

Branko Kolarić

Photonics Center, Institute of Physics, University of Belgrade, Pregrevica 118, 11080 Belgrade, Serbia

Abstract

This study investigates how the geometric architecture of nanostructured materials dictates their thermodynamic behavior, focusing on the complex interplay between convective, conductive, and radiative heat transfer in thermal and optical management. Drawing inspiration from natural photonic systems, we demonstrate that intricate, corrugated nanostructures profoundly alter thermodynamic responses, even inducing rare phenomena such as negative heat capacity. Crucially, our results establish a direct, tunable link between structural geometry and heat capacity that operates entirely independently of the material's chemical composition. By proving that thermodynamic properties can be precisely engineered through structural control alone, this work positions geometric design as a fundamental parameter for developing next-generation, energy-efficient materials and devices.

Keywords: thermodynamic response, negative heat capacity, natural photonics, biophotonics, optics.

Authors acknowledge that this research was supported by the EUROPEAN INNOVATION COUNCIL AND SMES EXECUTIVE: EIC Pathfinder Challenges 2022 call through the Research Grant 101115149 (project ARTEMIS).

UNDERSTANDING THE RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURAL DAMAGE AND SOIL LIQUEFACTION IN URBAN AREAS BY ANALYZING THE CHARACTERISTICS OF GROUND MOTION

Md. Mahamudur Rahman Papon

PhD in Built Environment, American East Coast University.

Department of Geography & Environment, University of Dhaka, Bangladesh.

Department of Environmental Science, State University of Bangladesh

Department of Architecture, State University of Bangladesh

Chief, Dept of Environmental Design & Research, EDCBD

ORCID: 0000-0002-1207-6868

Email: archmahamud@gmail.com* mmr_papon@harvestsourcingcorp.com,

Abstract

Soil liquefaction is a severe geotechnical failure mechanism that occurs when saturated, unconsolidated soils lose shear strength and stiffness under earthquake-induced cyclic loading, temporarily behaving like a fluid. This phenomenon poses a critical threat to urban infrastructure, particularly in deltaic regions with alluvial deposits and high groundwater tables, such as Bangladesh. This study aims to elucidate the relationship between structural damage and soil liquefaction by analyzing the complex characteristics of seismic ground motion. Traditionally, liquefaction assessments have relied on Peak Ground Acceleration. The recent literature indicates that PGA alone is an insufficient predictor. Instead, structural damage is heavily influenced by a combination of ground-motion intensity, duration, frequency content, and spectral characteristics. Research demonstrates that liquefied soils filter high-frequency seismic waves while amplifying low-frequency components, which significantly increases the vulnerability of low- to mid-rise buildings due to spectral resonance effects. Through a systematic approach analyzing earthquake characteristics, this study finds that liquefaction causes severe ground deformations, including primary settlement, lateral spreading, and total loss of bearing capacity. These deformations can lead to catastrophic structural consequences, such as the tilting, sinking, or complete collapse of buildings and lifelines. To mitigate these risks, the study highlights the necessity of implementing preventive geotechnical measures, including deep foundation design, avoiding construction on saturated soils, and employing ground improvement techniques such as vibro-flotation for soil densification. Ultimately, the research concludes that accurate seismic hazard prediction and resilient structural design in liquefaction-prone urban areas require comprehensive, site-specific soil characterization and multi-parameter ground motion evaluations.

Keywords: Soil Liquefaction, Ground Motion, Earthquake, Building Damage.

**GOVERNANCE AND STRATEGIC PLANNING OF RENEWABLE-POWERED
DESALINATION SYSTEMS: IMPLICATIONS FOR PUBLIC WATER MANAGEMENT**

Ngueya ESSALLAMI

Energy and Materials Team - Innovative Technologies Laboratory - ENSA, Abdelmalek Essaâdi
University, Tangier, Morocco

Ahmed KHOUYA

Energy and Materials Team - Innovative Technologies Laboratory - ENSA, Abdelmalek Essaâdi
University, Tangier, Morocco

M'barka EL MOUEDDEN

Laboratory of Spectroscopy, Molecular Modeling, Materials, Nanomaterial's, Water and Environment,
Mohammed V University, Faculty of Science, Agdal, Rabat, Morocco

Mohamed DAOUDI

Department of Law and Political Studies, Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Fez, Morocco

Abstract

This study examines how wind speed modeling influences the performance assessment of renewable energy-powered desalination systems and its implications for public decision-making. Wind speed was estimated using representative wind shear scenarios reflecting typical atmospheric conditions. The results indicate that variations in the wind shear exponent can increase the mean wind speed from about 8–9 m/s to nearly 11 m/s, leading to a rise in the capacity factor from approximately 25% to above 50%. As a consequence, the estimated annual energy production may increase from around 15 GWh/year to nearly 30 GWh/year. This variation directly impacts freshwater production, which can reach on the order of 10 million m³/year depending on the modeling assumptions. These findings show that relatively small differences in wind speed estimation can result in substantial variations in system performance. Overall, the results highlight that uncertainties in wind modeling can significantly influence the evaluation of renewable desalination systems and may affect public water supply planning decisions. Therefore, improving the accuracy of wind speed estimation is essential to support reliable and informed decision-making in sustainable desalination projects.

Keywords: Public decision-making, Energy–water nexus, Wind speed estimation, Wind shear exponent, Renewable desalination

A LITERATURE REVIEW ON BAUHINIA RUFESCENCE LEAVES USED FOR ANTI-MALARIAL ACTIVITY

Fatima Mustapha Bindawa*

Department of Pure and Industrial Chemistry Umaru Musa Yar'adua University, P.M.B,2218, Katsina,
Nigeria

Abubakar Sani

Department of Pure and Industrial Chemistry Umaru Musa Yar'adua University, P.M.B,2218, Katsina,
Nigeria.

*Corresponding author's email address: fatybindawa01@gmail.com

Abstract

Malaria remains a major public health challenge in sub Saharan Africa, and the increasing resistance of *Plasmodium falciparum* to commonly used antimalarial drugs has intensified the search for new plant-based therapies. This study evaluated the antiplasmodial activity and phytochemical constituents of the leaves and stem bark of *Bauhinia rufescens* (Fabaceae), a plant traditionally used for the management of malaria and febrile illnesses. The plant materials were collected, authenticated, shade dried, and pulverised, after which crude extracts were prepared using solvents of varying polarity. Preliminary phytochemical screening of the leaf and stem bark extracts was carried out using standard qualitative methods to detect major secondary metabolites. Antiplasmodial activity was assessed against *Plasmodium falciparum* using an in vitro assay, with extracts tested at graded concentrations and compared with a standard antimalarial drug as positive control. The phytochemical screening indicated the presence of bioactive classes including alkaloids, flavonoids, saponins, tannins, phenols, terpenoids, and steroids, with stronger expression in the polar extracts. The antiplasmodial evaluation showed that the ethanol and methanol extracts exhibited higher inhibitory activity than the n hexane and chloroform extracts, and activity increased with concentration, suggesting that the active principles are predominantly polar compounds. The findings support the ethnomedicinal use of *Bauhinia rufescens* for malaria treatment and recommend further work involving bioassay guided fractionation, isolation of active compounds, and in vivo toxicity and efficacy studies to establish safety and therapeutic potential.

Keywords: *Bauhinia rufescens*, antiplasmodial activity, *Plasmodium falciparum*, phytochemical screening, medicinal plants, malaria.

**NEUROPHARMACOLOGY OF BRAIN–COMPUTER INTERFACES: EMERGING
THERAPEUTIC STRATEGIES AND FUTURE PERSPECTIVES**

M. K. Vijayalakshmi

Faculty of pharmacy bharath institute of higher education and research, Chennai, India

S. Rubin thara

Faculty of pharmacy bharath institute of higher education and research, Chennai, India

N. Arshad Ahamed

Faculty of pharmacy bharath institute of higher education and research, Chennai, India

E. Praveena

Faculty of pharmacy bharath institute of higher education and research, Chennai, India

R. Swathi

Faculty of pharmacy bharath institute of higher education and research, Chennai, India

Abstract

Brain–Computer Interfaces (BCIs) represent a transformative advancement in neuroscience, enabling direct communication between the brain and external devices. While BCIs have primarily been developed for restoring motor function and communication in individuals with neurological disorders, neuropharmacology is emerging as a critical factor in optimizing their performance and therapeutic outcomes. Neuropharmacology examines how drugs influence neural signaling, synaptic plasticity, and neurotransmitter systems that are essential for accurate BCI operation. Pharmacological agents targeting dopamine, acetylcholine, glutamate, and gamma-aminobutyric acid (GABA) pathways may enhance attention, learning, signal stability, and neuroplasticity, thereby improving BCI efficiency. Furthermore, combining BCIs with pharmacological interventions has shown promise in the rehabilitation of patients with conditions such as stroke, Parkinson's disease, epilepsy, amyotrophic lateral sclerosis (ALS), and spinal cord injury. Advances in artificial intelligence, wearable neurotechnology, and closed-loop BCIs are further expanding the scope of personalized neuropharmacological therapies by enabling real-time monitoring and adaptive drug delivery. Despite these promising developments, challenges remain regarding long-term safety, ethical considerations, variability in patient responses, and regulatory approval for integrated neuropharmacological and BCI systems. Future research should focus on developing personalized treatment strategies, improving biocompatibility, and validating the clinical efficacy of combined pharmacological and neurotechnological approaches. The integration of neuropharmacology with brain–computer interfaces has the potential to revolutionize neurological rehabilitation and precision medicine, offering innovative therapeutic solutions that improve patient outcomes and quality of life.

Keywords: Brain–Computer Interface (BCI); Neuropharmacology; Neuroplasticity; Artificial Intelligence; Personalized Medicine.

**SKIN TOXICITIES OF TARGETED THERAPIES IN ONCOLOGY: A REVIEW OF CLINICAL
PRESENTATION AND MANAGEMENT**

V Keerthana

Ameerah, Avinash

Dr. R Saravanan

Abstract

Targeted therapies have become a cornerstone in the treatment of numerous cancers by modulating molecular pathways central to tumor pathogenesis. However, because the antigens and molecules they target also participate in normal skin homeostasis, cutaneous adverse events (CAEs) are a common and clinically significant consequence. (Springer) Cutaneous, mucosal, hair, and nail toxicities are observed in the majority of patients receiving these agents. (PubMed Central) The frequency and type of CAEs depend on the specific drug and may vary even among agents of the same class. Rashes, pruritus, and xerosis are among the most frequent manifestations. When severe, these reactions can negatively impact the course of treatment by necessitating dose reductions or even treatment discontinuation, further diminishing patient quality of life. (Springer) Distinct drug classes carry characteristic toxicity profiles. EGFR inhibitors commonly cause acneiform eruptions, which have been recognized as a surrogate marker of therapeutic response. BRAF, MEK, mTOR, HER2, and multikinase inhibitors each carry distinct dermatologic profiles, including hand-foot syndrome, photosensitivity, and lichenoid reactions. (PubMed Central) Skin toxicities range in severity from mild rashes to life-threatening conditions such as Stevens–Johnson syndrome, requiring prompt recognition and multidisciplinary management. (nih) Prevention, early recognition, and appropriate management by dermatologists are critical to ensuring continuation of antineoplastic therapy. (ScienceDirect) Collaboration between oncologists and dermatologists remains essential for optimizing patient outcomes.

Keywords: targeted therapy; cutaneous adverse events; acneiform rash; hand-foot syndrome; EGFR inhibitors; BRAF inhibitors; dermatologic toxicity; oncology; skin toxicity management; quality of life

FLAGELLAR MOTILITY CONTROLS BIOFILM FORMATION BY *Bacillus cereus* and *Yersinia enterocolitica*

Dr. Iram Liaquat

Department of Zoology, Govt. College University, Lahore, Pakistan. dr.iramliaquat@gcu.edu.pk.

Abstract

Bacteria live either independently as planktonic cells or in organized surface associated colonies called as biofilms. Biofilms play an important role in increased pathogenesis of bacteria and it is assumed that motility is one of the contributing factor towards biofilm initiation. This study was planned to identify the role of flagella in biofilm formation by constructing flagellated (wild type) and physically disrupted variants (non-motile). Total 10 clinical bacterial strains were screened. On the basis of morphological variation and motility, only two highly resistant strains were characterized biochemically, physiologically and genetically. Biofilm formation capacity of strains was analysed using three methods including congo red assay, test tube assay and liquid-interface coverslip assay. Afterwards, flagellar disintegration was induced by blending and centrifugation for 5, 10 and 15 minutes. Our results showed these strains as *Bacillus cereus* and *Yersinia enterocolitica* identified by 16S rRNA sequencing. Both strains produced significant biofilm by all three above mentioned methods. A motility test of these blended variants showed partial leading to completely diminished motility with increased blending time. The significant loss in biofilm formation after 15 minutes of blending confirmed the important contribution of flagella to the initiation of biofilm formation. This biofilm defect observed in flagella paralysed/minus variants presumably may be due to defects in attachments to surface at early stages. This study indicated that flagellar motility is crucial initially for surface attachment and subsequently for biofilm formation.

Key words: Biofilm formation, planktonic mode, MIC, flagellar motility, physical disruption

**INTEGRATING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS INTO RESOURCES-
LIMITED HEALTHCARE SYSTEM**

YETUNDE KEMI TIMOTHY

University Of Abuja, Abuja, FCT, Nigeria
timothyetundescholar@gmail.com

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) and robotics are transforming modern healthcare by improving diagnostic accuracy, enhancing clinical decision-making, and increasing operational efficiency. Their integration into healthcare systems has introduced new opportunities as well as challenges, including ethical concerns, technical limitations, and workforce adaptation. This article discusses the transformative potentials of these technologies and the strategic approaches for seamless integration into practice and healthcare practice and infrastructure. A literature review of various databases like ScienceDirect, PubMed and Google Scholar were using various search terms and strategies. Publications with focus on AI technology and robotics, integration, adoption or usage in healthcare written in English in the listed databases were reviewed. The functions of AI in prediction and diagnosis, medical imaging analysis, and clinical decision support system and Robotics in surgical precision, rehabilitative services and telehealth, as well as the integration strategies were identified. Structured interaction modality that includes AI literacy and training, public awareness, AI policy and regulation establishment, data security system, interdisciplinary collaboration monitoring and evaluation are keys to successful and ethical integration of AI and Robotics into healthcare system in the developing society.

Keywords: Artificial intelligence, robotics, integration, healthcare.

MEDICINAL PLANTS FROM THE MEDITERRANEAN AND NORTH AFRICA: NATURAL ALTERNATIVES AGAINST ANTIMICROBIAL RESISTANCE

Fatima El hilah*

Laboratory of Botany Biotechnology and Plant Protection, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

*Corresponding author address: fatima.elhilah@uit.ac.ma

Nadia Belahbib

Laboratory of Botany Biotechnology and Plant Protection, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

Jamila Dahmani

Laboratory of Botany Biotechnology and Plant Protection, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

Lalla Aicha Lrhorfi

Natural Resources and Sustainable Development, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco.

Abstract

Antimicrobial resistance (AMR) has emerged as a critical global health challenge, driven by the excessive use of conventional antibiotics and antifungals whose efficacy is increasingly undermined by resistant bacterial and fungal strains. In this context, medicinal plants from the Mediterranean basin and North Africa, regions recognized for their exceptional floristic diversity, have attracted growing scientific interest as alternative sources of bioactive compounds. This literature review aims to synthesize and critically analyze available scientific data on the antimicrobial activity of plants from this region against clinically relevant drug-resistant microorganisms. A systematic bibliographic search was conducted across PubMed, Scopus, and Web of Science databases, covering the period 2015–2025, using keyword combinations related to medicinal plants, antimicrobial resistance, and the targeted geographic areas. Only experimental studies, both *in vitro* and *in vivo*, published in indexed journals were retained for analysis. The review reveals that the families Lamiaceae, Asteraceae, and Apiaceae are the most frequently documented among active species. Plants such as *Thymus vulgaris*, *Origanum compactum*, *Nigella sativa*, *Artemisia herba-alba*, and *Rosmarinus officinalis* demonstrate significant inhibitory activity against clinically important resistant strains, including methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), extended-spectrum beta-lactamase-producing *Escherichia coli*, and fluconazole-resistant *Candida albicans*. These activities are primarily associated with high contents of phenolic compounds, terpenes, and flavonoids, with mechanisms of action involving membrane disruption and biofilm inhibition. These findings highlight the genuine therapeutic potential of Mediterranean and North African medicinal flora in addressing the AMR crisis. However, the limited availability of standardized *in vivo* studies and rigorous clinical trials continues to restrict their therapeutic translation. Systematic scientific valorization of this plant heritage is needed, through integrated approaches combining ethnobotany, phytochemistry, and experimental pharmacology.

Keywords: medicinal plants; antimicrobial resistance; antibacterial activity; antifungal activity; Mediterranean; North Africa.

**ADVOCACY FOR VOLUNTARY NON REMUNERATED BLOOD DONORS AS THE
SAFEST SOURCE OF BLOOD TRANSFUSION IN NIGERIA : A REVIEW**

Davies-Folorunso, Tesleemah O.

Lagos State Health Service Commission, Lagos Island, Lagos.

tesleemaholuwakemi@gmail.com

Department of Medical Laboratory Science, Faculty of Allied Health Sciences, College of Medicine,
Lagos State University, Ojo, Lagos.
tesleemaholuwakemi@gmail.com

Folorunso Jamiu.B.

Department of Medical Laboratory, Directorate of Health Services, Olabisi Onabanjo University, Ago-
Iwoye, Nigeria.

folorunsho.j@oouagoiwoye.edu.ng

Department of Medical Laboratory Science, Faculty of Basic Medical Sciences, Olabisi Onabanjo
University, Sagamu, Sagamu, Ogun State, Nigeria. folorunsho.j@oouagoiwoye.edu.ng

Adekola, Saheed.A*

Department of Medical Laboratory Science, Faculty of Allied Health Sciences, College of Health
Sciences, University of Abuja, Abuja, Nigeria

saheed.adekola@uniabuja.edu.ng

Centre for Community Health and Systems Support, University of Abuja, Nigeria

saheed.adekola@uniabuja.edu.ng

Muhibi, Musa.A.

Department of Medical Laboratory Science, Faculty of Allied Health Sciences, Federal University of
Health Sciences, Ila-Orangun, Osun State, Nigeria .

muhibi.musa@fuhsi.edu.ng

AbdulJamih-Folorunso, Maryam.T.

Faculty of Basic Clinical Sciences, Olabisi Onabanjo University, Sagamu campus, Sagamu, Ogun
State, Nigeria

maryamabduljamih@gmail.com

AbdulJamih-Folorunso, Zainab.T.⁸

Faculty of Pharmacy, Olabisi Onabanjo University, Sagamu campus, Sagamu, Ogun State, Nigeria.

ayinkeabduljamih@gmail.com

Abstract

Blood remains an irreplaceable therapeutic resource essential for the management of obstetric emergencies, trauma, surgical procedures, haematological disorders, cancer treatment, and other life-threatening conditions. However, many developing countries, including Nigeria, continue to face challenges in maintaining an adequate and safe blood supply. This paper examines the critical role of voluntary non-remunerated blood donation, quality management systems, and technological innovation in ensuring a safe and sustainable blood supply. The paper highlights the importance of voluntary blood donors as the safest source of blood, with significantly lower rates of transfusion-transmissible infections (TTIs) compared to family replacement and commercial donors. Recent Nigerian studies demonstrate TTI prevalence rates of approximately 2.2% among voluntary donors, 12.4% among replacement donors, and 16.6% among commercial donors, reinforcing the World Health Organization's recommendation for countries to achieve 100% voluntary non-remunerated blood donation. Key components of safe blood services, including donor selection and screening, laboratory testing, blood component processing, storage, cold chain management, and hemovigilance, are discussed. The paper also explores the role of quality management systems in ensuring compliance with standards, enhancing

patient safety, and improving operational efficiency. Furthermore, emerging innovations such as electronic donor management systems, digital inventory tracking, mobile donor applications, automation, and advanced testing technologies are presented as effective strategies for strengthening blood services. The study concludes that sustainable blood availability depends on increased voluntary donor recruitment, robust quality systems, and continuous innovation. Strengthened government commitment, stakeholder collaboration, and public awareness initiatives are essential for building sustainable blood transfusion services capable of meeting current and future healthcare demands in Nigeria.

Keywords: Voluntary non-remunerated donors, blood safety, quality management, transfusion-transmissible infections, Innovation.

**YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE YAĞ VİSKOZİTESİNİN RADYAL KAYMALI
YATAKLARDA HİDRODİNAMİK YAĞLAMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Assoc. Prof. EYYUP GERÇEKÇİOĞLU (ORCID: 0000-0002-8418-7364)

Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri-Türkiye

Email: gercek@erciyes.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8418-7364>

Assist.Prof. MEHMET ALBAŞKARA (ORCID: 0000-0001-9484-8368)

Afyon Kocatepe University, Iscehisar Vocation School, Department of Motor Vehicles and
Transportation Technologies, Afyonkarahisar - Türkiye

Email: albaskara@aku.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9484-8368>

MSc Student GÖKHAN ÇOLAK (ORCID: 0009-0008-0891-9106)

Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri - Türkiye

Email: gokhancolak716@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-0891-9106>

Özet

Hidrodinamik yağlamalı radyal kaymalı yataklarda sürtünme davranışı, yüzey pürüzlülüğü, yağ viskozitesi ve yatak boşluğu gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu parametrelerin uygun şekilde belirlenmesi, enerji kayıplarının azaltılması ve yatak performansının artırılması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü ve yağ viskozitesinin radyal kaymalı yataklarda hidrodinamik yağlama performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler TM290 hidrodinamik yatak deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada dört farklı yüzey pürüzlülüğü seviyesi ($R_a=0,54\text{ }\mu\text{m}$, $0,81\text{ }\mu\text{m}$, $1,21\text{ }\mu\text{m}$ ve $1,39\text{ }\mu\text{m}$), üç farklı yatak boşluğu ($0,12\text{ mm}$, $0,18\text{ mm}$ ve $0,28\text{ mm}$) ile iki farklı motor yağı (5W40 ve 0W30) kullanılmıştır. Her deney koşulunda sürtünme momenti ölçülmüş, elde edilen verilerden sürtünme katsayıları hesaplanarak Stribeck eğrileri oluşturulmuştur. Ayrıca minimum sürtünme katsayısı, bu değerin olduğu hız, yüksek hız bölgesindeki sürtünme davranışı ve kütle kaybı sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte en düşük yüzey pürüzlülüğünün her zaman en düşük sürtünme katsayısını sağlamadığı belirlenmiştir. Yağ viskozitesinin ve yatak boşluğunun değişmesiyle birlikte optimum çalışma koşullarının farklılaştığı görülmüştür. Özellikle düşük viskoziteli 0W30 yağında ve düşük yatak boşluğunda bazı deney gruplarında belirgin sürtünme artışları gözlenmiştir. Sonuçlar, hidrodinamik yağlama performansının yalnızca tek bir parametreye bağlı olmadığını, yüzey pürüzlülüğü, yağ viskozitesi ve yatak boşluğunun birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Hidrodinamik yağlama, radyal kaymalı yataklar, yüzey pürüzlülüğü, yağ viskozitesi, sürtünme katsayısı.

**EFFECTS OF SURFACE ROUGHNESS AND LUBRICANT VISCOSITY ON THE
HYDRODYNAMIC LUBRICATION PERFORMANCE OF RADIAL JOURNAL BEARINGS**

Abstract

The friction behavior of hydrodynamically lubricated radial journal bearings is affected by several parameters such as surface roughness, lubricant viscosity, and bearing clearance. Determining the appropriate combination of these parameters is important for reducing friction losses and improving bearing performance. In this study, the effects of surface roughness and lubricant viscosity on the hydrodynamic lubrication performance of radial journal bearings were investigated experimentally. The experiments were carried out using a TM290 hydrodynamic journal bearing test rig. Four different surface roughness levels ($R_a = 0.54 \mu\text{m}$, $0.81 \mu\text{m}$, $1.21 \mu\text{m}$, and $1.39 \mu\text{m}$), three different bearing clearances (0.12 mm , 0.18 mm , and 0.28 mm), and two different engine oils (5W40 and 0W30) were used. Friction torque values were measured under each test condition and the coefficient of friction was calculated to obtain Stribeck curves. In addition, the minimum friction coefficient, the speed corresponding to this value, friction behavior at high rotational speeds, and mass loss results were evaluated. The results showed that surface roughness has a significant influence on friction behavior. However, the lowest surface roughness did not always provide the lowest friction coefficient. It was also observed that the optimum operating conditions changed depending on lubricant viscosity and bearing clearance. In some test groups, particularly under low-clearance conditions with 0W30 oil, noticeably higher friction coefficients were obtained. The findings indicate that hydrodynamic lubrication performance cannot be explained by a single parameter and should be evaluated by considering the combined effects of surface roughness, lubricant viscosity, and bearing clearance.

Keywords: Hydrodynamic lubrication, radial journal bearing, surface roughness, lubricant viscosity, coefficient of friction.

**ÖRGÜ PROSESİ ÖNCESİ KİMYASAL KAPLAMA UYGULAMASININ ÖRGÜLÜ
UHMWPE VİNÇ HALATLARININ SÜRTÜNME PERFORMANSINA ETKİSİ**

Sibel DEMİR, MSc.

Kord Endüstriyel İp ve İplik San. Ve Tic. AŞ, Yıldız Technical University, Department of Chemical Engineering, Kırklareli-Türkiye
Email: sibeldemir@kordiplik.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4007-0284>

Hakkı Osman NECİPOĞLU

Kord Endüstriyel İp ve İplik San. Ve Tic. AŞ, Boğaziçi University, Department of Mechanical Engineering, Kırklareli-Türkiye
Email: osmannecipoglu@kordiplik.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-0144-7347>

Ömür ALKAN

Kord Endüstriyel İp ve İplik San. Ve Tic. AŞ, Bursa Technical University, Department of Mechanical Engineering, Kırklareli-Türkiye
Email: omuralkan@kordiplik.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-1080-5513>

Özet

Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) esaslı Dyneema® SK99 lifleri, yüksek özgül mukavemetleri, düşük yoğunlukları ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle vinç halatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, örgü öncesinde uygulanan geliştirilmiş bir kimyasal kaplama prosesinin örgülü vinç halatlarının sürtünme performansına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada 1143 denye Dyneema® SK99 ipliklerinden üretilmiş örgülü vinç halatları kullanılmıştır. Geliştirilmiş üretim yönteminde, ipliklerin bir araya getirilmesi öncesinde wax ve silikon emülsiyon bazlı bir kimyasal kaplama uygulaması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra iplikler büküm ve örgü işlemlerinden geçirilerek nihai halat yapısı oluşturulmuştur. Referans numuneler ise aynı üretim parametreleri ile ancak bu ön işlem uygulanmadan üretilmiştir. Numunelerin sürtünme performansları makara tabanlı bir test düzeneğinde sabit yük altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sürtünme performansı, halatın makara etrafına yarım ve tamdan fazla sarım konfigürasyonlarında sabit yük altında test edilmesiyle değerlendirilmiştir. Test sonuçlarına göre, geliştirilmiş kaplama prosesine sahip halatta yarım sarım koşulunda referans ürüne kıyasla yaklaşık %27.6 oranında, 1.5 sarım koşulunda ise yaklaşık %11.8 oranında iyileşme elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen kaplama prosesinin halat-makara arasındaki yük aktarım kapasitesini ve temas performansını artırdığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, örgü öncesi uygulanan geliştirilmiş kimyasal kaplama prosesinin Dyneema® SK99 vinç halatlarının sürtünme performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, mevcut üretim hattında büyük bir değişiklik gerektirmeden uygulanabilecek pratik ve endüstriyel açıdan etkili bir proses geliştirmesi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dyneema SK99, UHMWPE Halat, Sürtünme Performansı, Kimyasal Kaplama, Örgülü Halat.

**EFFECT OF PRE-BRAIDING PROCESS CHEMICAL COATING APPLICATION ON THE
FRICTION PERFORMANCE OF BRAIDED UHMWPE CRANE ROPES**

Abstract

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE)-based Dyneema® SK99 fibers are widely used in crane ropes due to their high specific strength, low density, and superior mechanical properties. This study aims to investigate the effect of an improved pre-braiding chemical coating process on the friction performance of braided Dyneema® SK99 crane ropes. In this study, braided crane ropes manufactured from 1143 denier Dyneema® SK99 yarns were used. In the improved production method, a wax and silicone emulsion-based chemical coating was applied prior to the assembly of the yarns. Subsequently, the yarns were subjected to twisting and braiding processes to form the final rope structure. Reference samples were produced using the same production parameters but without this pre-treatment. The friction performance of the samples was comparatively evaluated under constant load using a pulley-based test setup. Friction performance was evaluated by testing the ropes under constant load in half-wrap and more-than-full-wrap configurations around a pulley. According to the test results, the rope produced with the improved coating process showed an improvement of approximately 27.6% under the half-wrap condition and approximately 11.8% under the 1.5-wrap condition compared to the reference product. These results indicate that the developed coating process improved the load transfer capacity and contact performance between the rope and pulley. The findings demonstrate that the improved chemical coating process applied prior to braiding significantly enhances the friction performance of Dyneema® SK99 crane ropes. This approach offers a practical and industrially effective process improvement that can be implemented without requiring major modifications to the existing production line.

Keywords: Dyneema SK99, UHMWPE Rope, Friction Performance, Chemical Coating, Braided Rope.

**NACL İLE AKTİVASYONU YAPILMIŞ *Eriobotrya japonica* (YENİDÜNYA)
BİYOKÜTLESİNDEN ELDE EDİLEN AKTİF KARBON KULLANILARAK TEKSTİL ATIK
SULARINDAN REAKTİF TURUNCU 16 BOYARMADDESİNİN GİDERİM
KOŞULLARININ ARAŞTIRILMASI**

Yaren Emine Keskin Karakuş (ORCID:0009-0009-0835-0615)

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kimya Bölümü, 11100 Bilecik-
Türkiye

Email: yareneminekeskin@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-0835-0615>

Doç. Dr. Zerrin PAT(ORCID:0000-0001-9317-8657)

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 11100 Bilecik- Türkiye

Email: zerrin.pat@bilecik.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9317-8657>

Özet

Sanayileşme ve hızlı nüfus artışı ile birlikte su kaynaklarının kirlenmesi önemli çevresel sorunlardan biri haline gelmiştir. Özellikle tekstil endüstrisi kaynaklı atık sular, içerdiği sentetik boyarmaddeler nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Bu çalışmada, NaCl ile kimyasal aktivasyonu gerçekleştirilmiş yenedünya (*Eriobotrya japonica*) biyokütlesinden elde edilen aktif karbon kullanılarak, sulu çözeltilerden Reaktif Turuncu-16 boyarmaddesinin giderimi araştırılmıştır. Hazırlanan aktif karbon adsorbent olarak kullanılmış ve adsorpsiyon prosesinde pH, sıcaklık, temas süresi, adsorbent miktarı, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu gibi parametrelerin boyarmadde giderimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek giderim verimi; pH 1,00, 25 °C sıcaklık, 25 dakika temas süresi ve 0,12 g adsorbent miktarında elde edilmiştir. Ayrıca adsorpsiyona ait deneysel veriler kullanılarak bazı kinetik (yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve partikül içi difüzyon) ve izoterm (Langmuir, Freundlich, Temkin, D-R) modellerine uyumlulukları test edilmiştir ve elde edilen adsorbanların fiziksel ve kimyasal yapılarını yorumlamak amacıyla SEM-EDX, Zeta potansiyel, IR ve BET analizleri yapılmıştır. Hazırlanan adsorbent belirlenen optimum koşullarda sentetik olarak hazırlanan atık su örneğinde de test edilmiştir. Adsorbentin sentetik atık sudaki yüzde giderim değeri %98,20 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, NaCl ile aktive edilmiş yenedünya biyokütlesinden üretilen aktif karbonun tekstil atık sularındaki reaktif turuncu 16 boyarmaddesinin gideriminde etkili, ekonomik ve çevre dostu bir adsorbent olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, aktif karbon, *Eriobotrya japonica*, Reaktif Turuncu-16, tekstil atık suyu.

**INVESTIGATION OF REMOVAL CONDITIONS FOR REACTIVE ORANGE 16 DYE
FROM TEXTILE WASTEWATER USING ACTIVATED CARBON DERIVED FROM
NaCl-ACTIVATED *Eriobotrya japonica* (LOQUAT) BIOMASS**

Abstract

Water resource pollution has become a significant environmental issue alongside industrialization and rapid population growth. Wastewater from the textile industry, in particular, poses risks to the environment and human health due to the synthetic dyes it contains. This study investigated the removal of Reactive Orange-16 dye from aqueous solutions using activated carbon derived from loquat (*Eriobotrya japonica*) biomass that had been chemically activated with NaCl. The prepared activated carbon served as the adsorbent, and the effects of parameters such as pH, temperature, contact time, adsorbent dosage, and initial dye concentration on dye removal were examined. Experimental results showed that the highest removal efficiency was achieved at pH 1.00, a temperature of 25°C, a contact time of 25 minutes, and an adsorbent dosage of 0.12 g. Additionally, the experimental adsorption data were tested for fit against various kinetic models (pseudo-first-order, pseudo-second-order, and intra-particle diffusion) and isotherm models (Langmuir, Freundlich, Temkin, and D-R); furthermore, SEM-EDX, Zeta potential, IR, and BET analyses were conducted to characterize the physical and chemical structures of the resulting adsorbents. The prepared adsorbent was also tested on a synthetically prepared wastewater sample under the determined optimum conditions. The percentage removal value of the adsorbent in the synthetic wastewater was found to be 98.20%. The results indicate that activated carbon produced from NaCl-activated loquat biomass can serve as an effective, economical, and eco-friendly adsorbent for removing Reactive Orange-16 dye from textile wastewater.

Keywords: Adsorption, activated carbon, *Eriobotrya japonica*, Reactive Orange-16, textile wastewater.

**ACOUSTIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF SUKKARI DATE SEED POWDER-
REINFORCED POLYESTER BIOCOMPOSITES**

Abdullah SALEM*

Department of Physics, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gaziantep University,
Gaziantep, Türkiye

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-5617-0011>

E-Mail: Abdullah.salem.3@outlook.com

Prof. Dr. Vural Emir KAFADAR

Physics Engineering Department, Faculty of Engineering, Gaziantep University, Gaziantep, Türkiye

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-0943>

E-Mail: emir.kafadar@gmail.com

Prof. Dr. Eser OLĞAR

Physics Engineering Department, Faculty of Engineering, Gaziantep University, Gaziantep, Türkiye

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4637-5783>

E-Mail: eolgar@gmail.com

ABSTRACT

The growing demand for sustainable engineering materials has spurred the development of bio-based composites from agricultural waste. This study investigated Sukkari date seed powder as a natural reinforcement for polyester resin biocomposites. Date seeds collected from Al-Qassim, Saudi Arabia, were cleaned, dried, mechanically ground, and sieved to obtain a uniform particle size of 710 µm. Composite specimens containing 0%, 15%, 30%, and 45% date seed powder by weight were fabricated by hand mixing and casting, cured at room temperature, and subsequently post-cured in an oven at 85°C for 2 h. Mechanical characterization was performed through tensile and three-point bending tests in accordance with ASTM D638 and ASTM D790/ISO 178 standards, respectively. Acoustic characterization was carried out using impedance tube measurements following ISO 10534-2 and ASTM E1050 standards, employing both large- and small-diameter tubes to evaluate sound absorption performance across different frequency ranges. In addition, X-ray diffraction (XRD) analysis was conducted to investigate the structural characteristics of the Sukkari date seed powder. The developed biocomposites were fabricated with a fixed specimen thickness of 10 mm for acoustic testing. This research investigates the use of Sukkari date seed waste as a sustainable reinforcement material to enhance mechanical and acoustic performance. The study aims to provide preliminary insight into the potential of Sukkari date seed waste as a sustainable reinforcement for engineering and building acoustic applications. The findings are expected to contribute to the development of environmentally friendly bio-based composites and to support future investigations into acoustic materials derived from agricultural waste.

Keywords: Sukkari Date Seed Powder; Polyester Resin; Biocomposites; Agricultural Waste; Mechanical Properties; Acoustic Properties; X-Ray Diffraction; Sustainable Materials

GLUKOZ TESPİTİ İÇİN KULLANILABİLECEK NANOLİF MALZEMENİN
HAZIRLANMASI

Uğur Can GÖKCAN (ORCID: 0009-0008-7229-9538)

Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Science, Department of Chemistry Çanakkale-Türkiye

Email: ugur.gokcan17@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-7229-9538>

Prof. Dr. Ayhan ORAL (ORCID: 0000-0001-7295-6341)

Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Science, Department of Chemistry Çanakkale-Türkiye

Email: ayhanoral@comu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7295-6341>

Özet

Artan Diyabet sorunları nedeniyle Glukoz tespiti, diyabet gibi hastalıkların yönetiminde kritik bir rol oynamaktadır. Glukoz tespitinde biyosensörlerin kullanımı uzun süredir yaygındır. Bu sensörler, biyolojik bir molekül ile etkileşime giren ve bu etkileşimi ölçen cihazlar olarak tanımlanır. En yaygın kullanılan biyosensörler, glukoz oksidaz enzimi kullanarak glukozu oksitleyip hidrojen peroksit üretir ve bu reaksiyon bir elektriksel sinyale dönüştürülür. Bu süreçlerde, Glukoz oksidaz enziminin stabilitesi, biyosensörlerin güvenilirliği ve hassasiyeti üzerinde doğrudan etkili olduğundan, bu enzimin stabilitesinin artırılması, biyosensörlerin etkinliğini artıran önemli bir faktördür. Mevcut biyosensörler genellikle yüksek maliyetli, invaziv veya zaman alıcı olabilmektedir. Bu nedenle, daha hassas, hızlı ve ekonomik biyosensörlerin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Etkinliğin artırılması noktasındaki önemli alternatiflerin başında nanomalzemelerin kullanımı gelmektedir. Nanolif malzemeler, elektrokimyasal ve optik biyosensörlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı, glukoz oksidaz enziminin stabilitesini artırarak biyosensörlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini geliştirebilmektedir. Çalışmada Poli(laktik asit) polimeri kullanılarak nanolif malzeme elektroçirime metodu ile üretilmiştir. Bu polimerik nanolif matriks polianilin ile kaplanarak nihai nanolif malzeme hazırlanmıştır. Hazırlanan bu nanolif matriksin karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Glukoz Tespiti, Nanolif, sensör

Abstract

Glucose detection plays a critical role in the management of diseases such as diabetes, particularly in response to the increasing global prevalence of diabetes. Biosensors have long been widely employed for glucose detection. These devices are defined as analytical systems that detect and quantify interactions between a biological recognition element and a target analyte. The most commonly used glucose biosensors utilize the enzyme glucose oxidase (GOx) to catalyze the oxidation of glucose, producing hydrogen peroxide as a byproduct. This reaction is subsequently converted into an electrical signal for quantitative analysis. Since the stability of glucose oxidase directly influences the reliability and sensitivity of biosensors, enhancing the stability of this enzyme is considered a key factor in improving biosensor performance. Conventional glucose biosensors are often associated with high costs, invasiveness, or time-consuming analytical procedures. Therefore, there is a growing demand for the development of more sensitive, rapid, and cost-effective biosensing platforms. Among the most promising approaches to improving biosensor performance is the incorporation of nanomaterials. Nanofibrous materials have been extensively utilized in both electrochemical and optical biosensors owing to their high surface area and favorable physicochemical properties. Their incorporation can enhance the stability of glucose oxidase, thereby improving the accuracy, sensitivity, and reliability of glucose biosensors. In this study, nanofibrous materials were fabricated from poly(lactic acid) (PLA) using the electrospinning technique. The resulting polymeric nanofibrous matrix was subsequently coated with polyaniline (PANI) to obtain the final nanofibrous material. The morphology and structural characteristics of the prepared nanofibrous matrix were characterized using scanning electron microscopy (SEM).

Keywords: Glucose Detection, Nanofiber, Sensor

**KENEVİR TOHUMU EKSTARKTININ TRİPLE NEGATİF MEME KANSERİ
HÜCRELERİNDE (MDA-MB 231) TOKSİSİTE ve APOPTOZ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Zeynep Bulut (ORCID: 0009-0005-4236-1175)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: zbulut627@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-4236-1175>

Gülcan AKAL (ORCID: 0009-0009-5120-1527)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: gulcan.akal19@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-5120-1527>

Dr. Seval KONTAŞ YEDİER (ORCID: 0000-0003-3532-573X)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: sevalkontas07@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3532-573X>

Dr. Ceren BÖRÇEK KASURKA (ORCID: 0000-0002-5772-9463)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: cerenborcek@yahoo.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5772-9463>

Dr. Nihan KÜÇÜK YILMAZ (ORCID: 0000-0002-9205-1467)

Yalova University, Faculty of Medicine, Department of Medical Pharmacology, Yalova-Türkiye

Email: nihan.kucuk@yalova.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9205-1467>

Prof. Dr. Zülal ATLI ŞEKEROĞLU (ORCID: 0000-0002-3552-3819)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: zulalas@odu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3552-3819>

Özet

Kadınlarda meme kanseri en sık görülen malignitedir. MDA-MB 231 hücre hattı tarafından temsil edilen triple negatif meme kanseri prognoz, tedaviye cevap ve mortalite bakımından en problemli gruptur. En yaygın ve etkili kemoterapötikler ciddi yan etkilere sahiptir. Bu sebeple alternatif tedavi yaklaşım arayışları hızla devam etmektedir. Cannabis sativa L. (Kenevir), bitkisinde bulunan fitokannabinoidlerin anti-enflamatuar, hücre büyümesi inhibisyonu ve tümör regresyonu gibi etkilere sahip olduğunu gösteren çeşitli çalışmalar vardır. TÜBİTAK 2209(2024/1) kapsamında desteklenen çalışmamızda kenevir tohumundan süperkritik CO₂ ekstraksiyon yöntemi ile elde edilen kenevir tohumu ekstarktının (KTE) MDA-MB 231 hücre hattında hücre canlılığı ve apoptoz üzerine etkileri incelenmiştir. Hücre canlılığı analizi MTT testi ile yapılmıştır. Öncelikle KTE için IC₅₀ değerleri belirlenerek çalışma konsantrasyonları seçilmiştir. Çalışmamızda kullanılan KTE onsantrasyonları 150 µg/mL-300 µg/mL-600 µg/mL olmuştur. Belirlenen konsantrasyonlar uygulanarak 24, 48 ve 72 saatlik maruziyetlerin hücre canlılığı ve apoptoz üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Apoptoz tayini akrinin oranj/etidyum bromür ikili boyaması ile gerçekleştirilmiştir. İkili boyamanın ardından, kırmızı ve yeşil floresans sinyaller gözlemlenerek fotoğraflanmış; % apoptosis oranları belirlenmiştir. İstatistiksel analizler One-way

ANOVA ve Tukey post-hoc testi ile yapılmıştır ($p < 0.05$). Hücre canlılığı KTE konsantrasyonu artışına bağlı olarak azalma eğilimindedir. Maruziyet sürelerine bakıldığında ise maruziyet süresi uzadıkça hücre canlılığı anlamlı düzeyde azalmaktadır ($p < 0.05$). KTE muamelelerinde apoptoz da doza ve zamana bağlı olarak artış gösterme eğilimindedir ($p < 0.05$). Çalışma sonuçları, MDA-MB-231 hücrelerinde KTE konsantrasyonu arttıkça ve maruziyet süresi uzadıkça hücre canlılığının azaldığını ve apoptoz oranlarının arttığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: MDA-MB 231, Kenevir tohumu özütü, Hücre canlılığı, Apoptoz

THE EFFECTS OF HEMP SEED EXTRACT ON TOXICITY AND APOPTOSIS IN TRIPLE-NEGATIVE BREAST CANCER CELLS (MDA-MB 231)

Abstract

Breast cancer is the most common malignancy in women. Triple-negative breast cancer, represented by the MDA-MB 231 cell line, is the group presenting the greatest challenges in terms of prognosis, response to treatment and mortality. The most common and effective chemotherapeutic agents are associated with serious side effects. For this reason, the search for alternative treatment approaches is continuing apace. Studies have shown that phytocannabinoids found in the *Cannabis sativa* L. (hemp) plant possess effects such as anti-inflammatory properties, inhibition of cell growth and tumour regression. In our study, funded under TÜBİTAK 2209 (2024/1), the effects of hemp seed extract (HSE), obtained from hemp seeds via supercritical CO₂ extraction, on cell viability and apoptosis in the MDA-MB 231 cell line were investigated. Cell viability analysis was performed using the MTT assay. Firstly, the IC₅₀ values for HSE and doxorubicin were determined to select the test concentrations: 150 µg/mL, 300 µg/mL and 600 µg/mL for HSE. The effects of 24-, 48- and 72-hour exposures on cell viability and apoptosis were analysed using the specified concentrations. Apoptosis was assessed using a dual staining method with acridine orange and ethidium bromide. Following dual staining, the red and green fluorescence signals were observed and photographed; the percentage of apoptosis was determined. Statistical analyses were performed using one-way ANOVA and the Tukey post-hoc test ($p < 0.05$). Cell viability tends to decrease as KTE concentration increases. When exposure times are considered, cell viability decreases significantly as exposure time increases ($p < 0.05$). Apoptosis also tends to increase in a dose- and time-dependent manner following KTE treatment ($p < 0.05$). The results of the study demonstrate that, in MDA-MB-231 cells, cell viability decreases and apoptosis rates increase as KTE concentration rises and exposure time lengthens.

Keywords: MDA-MB 231, Hemp seed extract, Cell viability, Apoptosis

ARONYA EKSTRAKTININ TRİPLE NEGATİF MEME KANSERİ HÜCRELERİNDE (MDA-MB 231) TOKSİSİTE VE OKSİDATİF STRES ÜZERİNE ETKİLERİ

Gülcan AKAL (ORCID: 0009-0009-5120-1527)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: gulcan.akal19@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-5120-1527>

Zeynep Bulut (ORCID: 0009-0005-4236-1175)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: zbulut627@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-4236-1175>

Dr. Seval KONTAŞ YEDİER (ORCID: 0000-0003-3532-573X)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: sevalkontas07@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3532-573X>

Dr. Ceren BÖRÇEK KASURKA (ORCID: 0000-0002-5772-9463)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: cerenborcek@yahoo.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5772-9463>

Dr. Nihan KÜÇÜK YILMAZ (ORCID: 0000-0002-9205-1467)

Yalova University, Faculty of Medicine, Department of Medical Pharmacology, Yalova-Türkiye

Email: nihan.kucuk@yalova.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9205-1467>

Prof. Dr. Vedat ŞEKEROĞLU (ORCID: 0000-0002-8547-6571)

Ordu University, Faculty of Science and Letter, Department of Molecular Biology and Genetics,
Ordu-Türkiye

Email: sekeroglu@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8547-6571>

Özet

Meme kanseri, kadın nüfusunu etkileyen ölümcül bir hastalıktır. MDA-MB-231 hücre hattı ile modellenmekte olan triple negatif meme kanseri tedaviye direnci, kötü seyri ve yüksek ölüm oranlarıyla meme kanserinin klinik açıdan en zorlayıcı alt tipini oluşturmaktadır. Aronia melanocarpa fitokimyasallar açısından zengindir; özellikle antosiyaninler ve fenolik asitler bol miktarda bulunur. Aronia melanocarpa ekstarktı diğer berry meyveleriyle kıyaslandığında en yüksek toplam fenol, antioksidan aktivite ve bireysel fenolik asit seviyelerine sahiptir. TÜBİTAK 2209(2024/1) kapsamında desteklenen çalışmamızda süperkritik CO₂ ekstraksiyon yöntemi ile elde edilen aronya ekstraktı (AE) kullanılmıştır. MDA-MB 231 hücre hattında hücre canlılığı ve oksidatif stres parametreleri incelenmiştir. Hücre canlılığı analizi MTT testi ile yapılmıştır. Öncelikle AE için IC₅₀ değerleri belirlenerek çalışma konsantrasyonları seçilmiştir; AE için belirlenen çalışma konsantrasyonları 100 µg/mL-200 µg/mL-400 µg/mL. Belirlenen konsantrasyonların 24, 48 ve 72 saatlik maruziyetlerinin hücre canlılığı ve oksidatif stres üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Oksidatif stres analizleri için, reaktif oksijen türlerinin varlığı DCFH-DA boyama yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. DCFH-DA uygulamasının ardından yeşil floresan gözlemlenerek fotoğraflanmıştır Her bir muamele için floresan

yoğunluğu hesaplanarak kontrol grubuna göre artış oranı belirlenmiştir. İstatistiksel analizler One-way ANOVA ve Tukey post-hoc testi ile yapılmıştır ($p < 0.05$). AE konsantrasyonu arttıkça ve maruziyet süresi uzadıkça hücre canlılığı anlamlı düzeyde azalmaktadır ($p < 0.05$). AE muamelesinde reaktif oksijen türleri özellikle zamana bağlı olarak artış gösterme eğilimindedir ($p < 0.05$). Çalışma sonuçları, MDA-MB-231 hücrelerinde AE'nin "ROS bağımlı hücre ölümü" mekanizmasını uzun süreli uygulamada (72 saat) aktif tuttuğu ve bu sayede hücre canlılığını baskıladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: MDA-MB 231, Aronya özütü, Hücre canlılığı, Oksidatif stres

**THE EFFECTS OF ARONIA EXTRACT ON TOXICITY AND OXIDATIVE STRESS IN
TRIPLE-NEGATIVE BREAST CANCER CELLS (MDA-MB 231)**

Abstract

Breast cancer is a fatal disease affecting the female population. Triple-negative breast cancer, modelled using the MDA-MB-231 cell line, constitutes the most clinically challenging subtype of breast cancer due to its resistance to treatment, poor prognosis and high mortality rates. Aronia melanocarpa is rich in phytochemicals; in particular, it contains abundant anthocyanins and phenolic acids. When compared with other berry fruits, Aronia melanocarpa extract possesses the highest levels of total phenols, antioxidant activity and individual phenolic acids. In our study, supported under TÜBİTAK 2209 (2024/1), aronia extract (AE) obtained via the supercritical CO₂ extraction method was used. Cell viability and oxidative stress parameters were investigated in the MDA-MB 231 cell line. Cell viability analysis was performed using the MTT assay. Firstly, IC₅₀ values were determined for AE to select the test concentrations: 100 µg/mL, 200 µg/mL and 400 µg/mL. The effects of 24-, 48- and 72-hour exposure to these concentrations on cell viability and oxidative stress were analysed. For oxidative stress analyses, the presence of reactive oxygen species was detected using the DCFH-DA staining method. Following DCFH-DA application, green fluorescence was observed and photographed. The fluorescence intensity was calculated for each treatment, and the increase relative to the control group was determined. Statistical analyses were performed using one-way ANOVA and the Tukey post-hoc test ($p < 0.05$). As the AE concentration increases and the exposure time lengthens, cell viability decreases significantly ($p < 0.05$). Reactive oxygen species tend to increase, particularly over time, following AE treatment ($p < 0.05$). The results of the study indicate that AE in MDA-MB-231 cells maintains the 'ROS-dependent cell death' mechanism over a prolonged period (72 hours), thereby suppressing cell viability.

Keywords: MDA-MB 231, Aronia extract, Cell viability, Oxidative stress

**MİKRODALGA DESTEKLİ ARAYÜZEY MÜHENDİSLİĞİ İLE FOTOKATALİZÖRLERİN
GELİŞTİRİLMESİ: HETEROEKLEM OLUŞUMU, KARBON TABANLI DESTEKLER VE
YÜK TRANSFER MEKANİZMALARI**

Araş. Gör. Kübra KÖŞE KAYA

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği
Bölümü Sivas-Türkiye

Email: kubra.kaya@sivas.edu.tr

Orcid: 0000-0001-9868-7442

Özet

Tek bileşenli yarı iletken fotokatalizörlerde görülen hızlı elektron–oyuk rekombinasyonu, sınırlı görünür ışık absorpsiyonu ve düşük yüzey redoks verimi gibi dezavantajlar çok bileşenli heteroyapıların geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Ancak heteroeklem tasarımı yalnızca iki malzemenin bir araya getirilmesi yeterli değildir. Arayüzey temasının niteliği, bileşenlerin dağılımı, yük transfer yönü, yüzey kimyası ve kusur yapısı gibi unsurlar fotokatalitik performansı doğrudan belirlemektedir. Mikrodalga destekli sentez, hızlı ısıtma ve seçici enerji soğurması sayesinde farklı bileşenlerin kısa sürede etkileşmesini sağlayabilmekte böylece metal oksit–metal oksit, metal sülfür–oksit, MOF/COF–yarı iletken, karbon–yarı iletken ve MXene tabanlı heteroyapıların oluşumunda etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Bu derlemede mikrodalga destekli yöntemlerle hazırlanan heteroeklem fotokatalizörler arayüzey mühendisliği, karbon tabanlı iletken destekler, manyetik geri kazanım, görünür ışık aktivitesi ve yük taşıyıcılarının ayrılması bakımından değerlendirilmiştir. TiO_2/rGO , $\text{N-TiO}_2/\text{rGO}$, $\text{TiO}_2/\text{aktif karbon}$, CQD/TiO_2 , BiOBr/rGO , ZnO/CuO , $\text{MnO}_2/\text{TiO}_2$, TiO_2/COF , CdS/MOF , $\text{TiO}_2/\text{MXene}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}/\text{MXene}$ ve metal sülfür tabanlı heteroyapılar sentez parametreleri ile arayüzey özellikleri arasındaki ilişki üzerinden karşılaştırılmıştır. Heteroeklem mekanizmaları değerlendirilirken boya bozunma verimlerinin yanı sıra PL ve TRPL analizlerinden, EIS, fotokurent ve Mott–Schottky ölçümlerinden, XPS ve EPR bulgularından, radikal yakalama deneylerinden ve dönüşüm ürünlerinin analizinden birlikte yararlanılmıştır. İncelenen çalışmalar, mikrodalga işleminin bazı sistemlerde daha güçlü arayüzey teması, daha homojen bileşen dağılımı ve daha düşük rekombinasyon hızı sağlayabildiğini göstermektedir. Buna karşılık, mikrodalga gücünün gereğinden yüksek seçilmesi veya işlem süresinin uzatılması, parçacıkların aglomerasyonuna, bazı bileşenlerin bozunmasına, arayüzey kusurlarının kontrolsüz biçimde artmasına ve gözenek yapısının kısmen kaybolmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, mikrodalga destekli heteroeklem sentezinde hedef yalnızca kısa sürede ürün elde etmek olmamalıdır. Esas amaç, redoks kapasitesini koruyan, yük transferi deneysel olarak doğrulanmış ve uzun süreli kullanımda kararlılığını sürdürebilen arayüzeyler oluşturmaktır.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga destekli sentez, heteroeklem, arayüzey mühendisliği, yük transferi, karbon tabanlı destekler, fotokataliz.

**MICROWAVE-ASSISTED INTERFACIAL ENGINEERING OF PHOTOCATALYSTS:
HETEROJUNCTION CONSTRUCTION, CARBONACEOUS SUPPORTS, AND CHARGE-
TRANSFER PATHWAYS**

Abstract

The photocatalytic performance of single-component semiconductors is often limited by rapid electron–hole recombination, poor visible-light utilization, and restricted surface redox activity. Heterostructure design is therefore widely employed to address these limitations. However, improved performance cannot be achieved simply by combining two materials. The nature of the interfacial contact, component distribution, local coordination environment, defect structure, band alignment, and carrier-transfer direction together determine whether a multicomponent system functions as an efficient photocatalyst or merely as a physical mixture. Microwave-assisted synthesis offers a useful route for interfacial engineering because rapid dielectric heating and selective microwave absorption can promote short-time nucleation, intimate contact between dissimilar components, and controlled growth of hybrid structures. This review examines microwave-assisted heterojunction design in carbon–semiconductor, oxide–oxide, sulfide–oxide, MOF/COF–semiconductor, and MXene-based photocatalytic systems. Representative materials, including TiO₂/rGO, N-TiO₂/rGO, carbon dot/TiO₂, BiOBr/rGO, ZnO/CuO, MnO₂/TiO₂, TiO₂/COF, CdS/MOF, TiO₂/MXene, and magnetic Fe₃O₄/ZnO@MXene composites, are comparatively evaluated. The discussion does not rely solely on pollutant removal efficiencies. Heterojunction mechanisms are assessed using photoluminescence and time-resolved photoluminescence analyses, electrochemical impedance spectroscopy, photocurrent response, Mott–Schottky measurements, X-ray photoelectron spectroscopy, electron paramagnetic resonance, radical-scavenging experiments, and transformation-product analysis. These complementary methods are considered together to distinguish experimentally supported charge-transfer pathways from mechanisms inferred only from photocatalytic activity. Available studies indicate that microwave processing can improve interfacial contact, reduce charge-carrier recombination, and promote a more homogeneous distribution of active components. Nevertheless, excessive microwave power or prolonged irradiation may cause particle agglomeration, component degradation, uncontrolled interfacial defects, or partial loss of pore structure. Accordingly, microwave-assisted heterojunction synthesis should be optimized not only for rapid production but also for the formation of stable interfaces with preserved redox capability and experimentally verified charge-transfer pathways.

Keywords: Microwave-assisted synthesis, heterojunction, interfacial engineering, charge transfer, carbonaceous supports, photocatalysis.

**SUSTAINABLE PHOTOCATALYTIC TREATMENT OF DISPERSE BLUE 56
CONTAMINATED WASTEWATER USING CaO NANOPARTICLES: PERFORMANCE
OPTIMIZATION, KINETIC EVALUATION AND MECHANISTIC INSIGHTS**

Dr. Öğr. Üyesi Murat Kıranşan (ORCID: 0000-0002-8520-6563)

Gümüşhane University, Gümüşhane Vocational School, Department of Chemistry and Chemical
Processing Technologies, 29100, Gümüşhane-Türkiye

Email: murat.kiransan@gumushane.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8520-6563>

Özet

Bu çalışma, sulu çözeltide Dispers Mavi 56 (DM 56) boyarmaddesinin, hidrotermal yöntemle sentezlenen CaO nanoparçacıkları kullanılarak fotokatalitik bozunumun etkili bir nanokatalizör olarak incelemektedir. Katalizörün fotokatalitik aktivitesi; CaO nanokatalizör dozajı, başlangıç DM 56 konsantrasyonu, çözelti pH'ı ve inorganik ile organik radikal yakalayıcıların varlığı gibi temel proses parametrelerinin etkisi incelenerek sistematik olarak değerlendirilmiştir. Optimize edilmiş deneysel koşullar altında, yani 1.0 g L⁻¹ katalizör dozajı, 20 mg L⁻¹ DM 56 konsantrasyonu, doğal pH ve görünür ışık ışınlamı altında, CaO nanoparçacıkları 120 dakika içerisinde %98.72 degradasyon verimine ulaşmıştır. Ayrıca, katalizör dozajı 1.0 g L⁻¹ seviyesinde sabit tutulurken başlangıç DM 56 konsantrasyonunun 10 mg L⁻¹'ye düşürülmesi, bozunma verimini %99.48'e yükseltmiş ve bu durum CaO nanoparçacıklarının daha düşük kirletici konsantrasyonlarında üstün fotokatalitik aktivite sergilediğini göstermiştir. Bunun yanı sıra, doğal pH koşullarında elde edilen dikkat çekici bozunma performansı, uygun boyarmadde-katalizör etkileşimlerini ve etkin radikal aracılı oksidasyonu işaret etmekte olup, CaO nanoparçacıklarının DM 56 ile kontamine olmuş atık suların arıtımında ek pH ayarlamasına ihtiyaç duyulmadan pratik olarak uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Tekrar kullanılabilirlik testleri ise kabul edilebilir operasyonel kararlılığı göstermiş, bozunma verimi altı ardışık döngü sonunda %98.72'den %84.16'ya düşmüştür. Genel olarak elde edilen sonuçlar, CaO nanoparçacıklarının boyarmadde içeren atık suların arıtımı için önemli bir fotokatalitik potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: CaO nanopartikülleri, Disperse Mavi 56, Fotokatalitik bozunma, Görünür ışıkla ışınlama, Serbest radikal temizleyiciler, Boya ile kirlenmiş atık su.

Abstract

This study investigates the photocatalytic degradation of Disperse Blue 56 (DB 56) in aqueous solution using hydrothermally synthesized CaO nanoparticles as an effective nanocatalyst. The photocatalytic activity of the catalyst was systematically assessed by examining the influence of key operational parameters, including CaO nanocatalyst dosage, initial DB 56 concentration, solution pH, and the presence of inorganic and organic radical scavengers. Under the optimized experimental conditions of 1.0 g L⁻¹ catalyst dosage, 20 mg L⁻¹ DB 56 concentration, natural pH, and visible-light irradiation, the CaO nanoparticles achieved a degradation efficiency of 98.72% within 120 min. Furthermore, decreasing the initial DB 56 concentration to 10 mg L⁻¹ while keeping the catalyst dosage constant at 1.0 g L⁻¹ increased the degradation efficiency to 99.48%, demonstrating the superior photocatalytic activity of CaO nanoparticles at lower pollutant concentrations. In addition, the remarkable degradation performance obtained under natural pH conditions suggests favorable dye-catalyst interactions and efficient radical-mediated oxidation, highlighting the practical applicability of CaO nanoparticles for the treatment of DB 56-contaminated wastewater without the need for additional pH adjustment. Reusability tests further revealed acceptable operational stability, as the degradation efficiency decreased from 98.72% to 84.16% after six consecutive cycles. Overall, the obtained results indicate that CaO nanoparticles possess significant photocatalytic potential for the treatment of dye-contaminated wastewater.

Keywords: CaO nanoparticles, Disperse Blue 56, Photocatalytic degradation, Visible-light irradiation, Radical scavengers, Dye-contaminated wastewater.

PHARMACOGENOMICS AND PRECISION

K. P. Thevikka

Faculty of pharmacy. Bharath institute of higher education and research, chennai, India.

N. Manjula perachi devi.

Faculty of pharmacy. Bharath institute of higher education and research, chennai, India.

S. Rubin thara

Faculty of pharmacy. Bharath institute of higher education and research, chennai, India.

Abstract

Pharmacogenomics is an emerging field that studies how genetic variations influence an individual's response to medications. It plays a vital role in precision medicine by enabling healthcare professionals to select the most appropriate drug and dosage based on a patient's genetic profile. Traditional drug therapies often follow a "one-size-fits-all" approach, which may result in variable therapeutic outcomes, adverse drug reactions, or treatment failure. Pharmacogenomics addresses these challenges by identifying genetic factors that affect drug absorption, distribution, metabolism, and excretion. Precision medicine integrates pharmacogenomic information with clinical, environmental, and lifestyle factors to provide personalized treatment strategies. This approach improves therapeutic efficacy, minimizes adverse drug reactions, reduces healthcare costs, and enhances patient safety. Pharmacogenomic testing has already shown significant clinical value in areas such as oncology, cardiology, psychiatry, and infectious diseases, where genetic differences strongly influence drug response. Despite its promising potential, the widespread implementation of pharmacogenomics faces several challenges, including high testing costs, limited awareness among healthcare professionals, ethical concerns regarding genetic data, and inadequate clinical infrastructure. Continued advancements in genomic technologies, bioinformatics, and artificial intelligence are expected to overcome these barriers and promote broader adoption of precision medicine in routine healthcare. Overall, pharmacogenomics represents a major advancement in modern medicine by supporting individualized drug therapy and improving clinical outcomes. As research and technology continue to evolve, pharmacogenomics is expected to become an essential component of future pharmaceutical care, contributing to safer, more effective, and patient-centered healthcare.

Key words : Personalized Medicine, Genetic Variations, Drug Response, Genomic Medicine

CRISPR/Cas9-MEDIATED PD-1 GENE KNOCKOUT IN JURKAT T CELLS ENHANCES ANTI-TUMOR IMMUNE RESPONSE AGAINST TRIPLE-NEGATIVE BREAST CANCER CELLS

Ethirajan BARANI

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Humanities, SRM Institute of Science and Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu, India.

E-mail: baraniethirajan28@gmail.com

Dr. G PRIYA

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Humanities, SRM Institute of Science and Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu, India.

E-mail: priyag3@srmist.edu.in

ORCID : 0000-000229711792

S Indhu

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Humanities, SRM Institute of Science and Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu, India.

authors e-mail: is5398@srmist.edu.in

Dr. Murugesan KAMARAJ*

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Humanities, SRM Institute of Science and Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu, India.

*Corresponding author E-mail: drkamarajm@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0111-8524

Abstract

Triple-negative breast cancer (TNBC) is an aggressive breast cancer subtype with poor prognosis and limited targeted treatment options. The programmed cell death protein-1 (PD-1/PDCD1) pathway contributes to T-cell exhaustion, reducing effective anti-tumor immunity. CRISPR/Cas9-mediated gene editing provides a promising strategy to enhance T-cell function by disrupting immune checkpoint genes. This study aims to evaluate the effect of **CRISPR/Cas9-mediated PD-1 knockout in Jurkat T cells** against **MDA-MB-231 TNBC cells** using an in vitro co-culture model. Guide RNAs targeting the **PDCD1** gene will be designed and introduced into Jurkat cells, and successful gene editing will be confirmed through molecular analyses. The anti-tumor efficacy of edited Jurkat cells will be assessed by measuring tumor cell viability, cytotoxicity, cytokine secretion, and apoptosis using **CCK-8 assay, LDH assay, ELISA, qRT-PCR, and Western blot analysis**. The study is expected to demonstrate that PD-1 disruption enhances T-cell-mediated anti-tumor responses against TNBC cells. These findings may provide a foundation for developing **CRISPR-engineered immunotherapies** and support future advancement of engineered T-cell therapies for solid tumors.

Keywords : CRISPR/Cas9, T cell, PD-1 Knockout, Triple-Negative Breast Cancer (TNBC)

**PLANT, MICROBE AND INSECT INTERACTIONS FROM THE CHEMICAL
PERSPECTIVE: APPROACHING THROUGH ENDOPHYTES, ALLELOCHEMICALS,
SOIL MICROBES AND THEIR METABOLITES FOR SUSTAINABLE RESISTANCE
AGAINST PESTS**

S Indhu

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Humanities, SRM Institute of Science and
Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu, India.
authors e-mail: is5398@srmist.edu.in

Dr. G PRIYA

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Humanities, SRM Institute of Science and
Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu, India.
²E-mail: priyag3@srmist.edu.in
ORCID : 0000-000229711792

Ethirajan BARANI

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Humanities, SRM Institute of Science and
Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu, India.
³E-mail: baraniethirajan28@gmail.com

Dr. Murugesan KAMARAJ*

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Humanities, SRM Institute of Science and
Technology, Ramapuram Campus, Chennai- 600089, Tamil Nadu, India.
*Corresponding author E-mail: drkamarajm@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0111-8524

Abstract

Resistance developed against hemipteran pests, including aphids, whiteflies and mealybugs, to commonly used insecticides has led to the focus on sustainable pest management strategies. Several recent publications have stressed upon the concept that defense mechanisms in plants are not controlled only by genetic factors but also involve complex chemical and microbial interactions between plant defense mechanisms, endophytic bacteria and fungi, rhizospheric bacteria, and several secondary metabolites of the plant. However, these processes are mostly studied separately, hence making it quite difficult to analyze the role of these processes in overall plant defense mechanisms. This review article discusses the latest scientific information regarding interactions of chemical signalling pathways among plants, endophytes, soil microflora, and insects. In addition, we provide an explanatory model describing the relationship between plant secondary metabolites, microbes, and the microbiome of the insect that regulates their defense reactions. Finally, there is a description of some future perspectives in terms of artificial microbial community design, microbiome engineering, metabolite screening using artificial intelligence, and omics technologies as approaches to designing next-generation sustainable biopesticides and plant microorganisms. This review shows the reasoning behind the transition from classical studies to the study of the interaction between plants, microbes, and insects as an approach to sustainable pest management in a changing climate.

Keywords: Plant microbiome, endophytes, allelochemicals, soil microbiome, sucking insects, metabolomics, sustainable agriculture.

SUSTAINABLE FERTILIZATION: SYNERGY OF TOFU WASTE LOF AND NPK ON CUCUMBER GROWTH, YIELD, AND AGRIBUSINESS BENEFIT

Undang*

Agrotechnology Studi Program, Agricultural Faculty, Universitas Siliwangi. Jl. Siliwangi No. 24
Tasikmalaya 46115, West Java. Indonesia
undang@unper.ac.id

Yogi Nirwanto

Agrotechnology Studi Program, Agricultural Faculty, Universitas Siliwangi. Jl. Siliwangi No. 24
Tasikmalaya 46115, West Java. Indonesia
<https://orcid.org/0009-0003-2781-3116>
yogi.nirwanto@unsil.ac.id

Ristina Siti Sundari*

Agribusiness Study Program, Agricultural Faculty, Universitas Perjuangan Tasikmalaya. Jl. PETA No.
177 Tasikmalaya 46115, West Java, Indonesia
<https://orcid.org/0000-0002-5310-8520>
ristinasitisundari@unper.ac.id

Kania Nanda Oktaviani

Agrotechnology Studi Program, Agricultural Faculty, Universitas Siliwangi. Jl. Siliwangi No. 24
Tasikmalaya 46115, West Java. Indonesia

Rizky Adi Nugraha Tarigan

Agrotechnology Studi Program, Agricultural Faculty, Universitas Siliwangi. Jl. Siliwangi No. 24
Tasikmalaya 46115, West Java. Indonesia
<https://orcid.org/0000-0002-6076-1165>
rizkyadi1029@gmail.com

Abstract

The increasing demand for sustainable agricultural practices has encouraged the integration of organic waste into fertilization strategies. Tofu production generates liquid waste rich in nutrients, which can potentially substitute part of inorganic fertilizers while reducing environmental impact. This study investigated the effect of combining tofu waste LOF with NPK on the growth and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.). The experiment was conducted using a Randomized Block Design (RBD) with seven treatments and four replications: A (NPK 300 kg/ha, control), B (200 ml/L + NPK 50 kg/ha), C (200 ml/L + NPK 100 kg/ha), D (300 ml/L + NPK 50 kg/ha), E (300 ml/L + NPK 100 kg/ha), F (400 ml/L + NPK 50 kg/ha), and G (400 ml/L + NPK 100 kg/ha). Analysis of variance revealed that the combination of tofu waste liquid fertilizer and NPK significantly affected plant height, stem diameter, leaf area, fruit diameter, fruit length, number of fruits per plant, fruit weight per plant, and fruit weight per plot. Among the treatments, the application of tofu waste LOF at 400 ml/L, combined with NPK at 50 kg/ha, produced the best growth performance and the highest yield. These findings highlight the potential of integrating agro-industrial waste with inorganic fertilizers to enhance cucumber productivity while promoting sustainable fertilization practices. This approach supports circular economy principles in vegetable production systems

Keywords: Substitution; sustainability fertilization; tofu LOF

**RELATIONSHIP BETWEEN VITAMIN D PLASMA LEVEL AND FOXP3 GENE
EXPRESSION AMONG RHEUMATOID ARTHRITIS PATIENTS**

Parisa Zafari^{1*}

Department of Immunology, Faculty of Medicine, Hamadan University of Medical Sciences,
Hamadan, Iran

Correspondence: Parisa Zafari

Email: pzafari.70@gmail.com

Orcid Id: 0000-0002-7826-1185

Abstract

Background and Aim: Rheumatoid arthritis (RA) is an autoimmune disease. It seems that the function of regulatory T cells (Tregs) is compromised in RA. Foxp3 is a critical transcription factor of these cells. The aim of this study was to determine the relationship of vitamin D plasma level with Foxp3 gene expression in the patients with RA. Material and Methods: 18 untreated RA patients and 41 healthy people participated in this study. Plasma levels of vitamin D were measured by competitive ELISA method. Foxp3 gene expression was also determined by using realtime PCR technique. Results: The expression of Foxp3 gene was significantly lower in RA patients compared to that in the healthy controls ($p < 0.001$). There was no significant relationship between vitamin D plasma levels with the rate of Foxp3 gene expression. Conclusion: We found low levels of vitamin D could not affect the expression of Foxp3 gene. It seems that vitamin D deficiency cannot be considered as an effective environmental factor in the pathogenesis of RA.

Keywords: Vitamin D, Foxp3, Rheumatoid arthritis

**THE ASSOCIATION BETWEEN THE PLASMA SUGAR AND LIPID PROFILE WITH THE
GENE EXPRESSION OF THE REGULATORY PROTEIN OF MTOR (RAPTOR) IN
PATIENTS WITH RHEUMATOID ARTHRITIS**

Parisa Zafari^{1*}

Department of Immunology, Faculty of Medicine, Hamadan University of Medical Sciences,
Hamadan, Iran

Correspondence: Parisa Zafari

Email: pzafari.70@gmail.com

Orcid Id: 0000-0002-7826-1185

Abstract

Background: Rheumatoid arthritis (RA) is an autoinflammatory and self-perpetuating disease with both articular and extra-articular manifestations, such as cardiovascular complications, which are the leading cause of mortality and morbidity in RA patients. Impaired sugar and lipid metabolism are considered as the critical risk factors for cardiovascular disease (CVD). Regarding the regulatory function of Raptor in the immunometabolism, in this study, we evaluated the association between plasma sugar and lipid profiles with the gene expression of Raptor and the cytokine tumor necrosis factor- α (TNF- α), as an inflammatory mediator, in peripheral blood leukocyte of RA patients. **Material and methods:** Thirty-five RA patients who received combinational disease modified anti-rheumatoid drugs (DMARD) regimen and thirty healthy subjects enrolled in this study. The gene expression of Raptor was assessed by the real-time PCR method, and the Plasma levels of glucose and lipids, as well as TNF- α , were obtained using Hitachi device and enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) technique, respectively. **Results:** The gene expression of Raptor was reduced significantly in RA patients compared to the healthy subjects ($p = .001$). The plasma level of HDL was significantly higher in RA patients than the control group ($p = .001$), while the plasma level of LDL was reduced significantly in these patients ($p = .001$). **Conclusion:** In our study, the reduced gene expression of Raptor may contribute to the impaired immunometabolism in RA patients, which is independent of plasma sugar and lipid profile.

**HUMIC SUBSTANCES DERIVED FROM MUNICIPAL SOLID WASTE COMPOST AS
NATURAL BIOSTIMULANTS FOR TOMATO AND ALFALFA SEED GERMINATION**

Ilham Chennak

Laboratory of Water and Environment, Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Chouaïb
Doukkali University, 24 000, El Jadida, Morocco.

Laboratory of Health and Environment, Department of Biology, Faculty of Sciences Ain Chock,
Hassan II, 20 470 Casablanca, Morocco.

Soufiane Tahiri, Mohammed El Krati

Laboratory of Water and Environment, Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Chouaïb
Doukkali University, 24 000, El Jadida, Morocco

Samah Ait Benichou*

Laboratory of Health and Environment, Department of Biology, Faculty of Sciences Ain Chock,
Hassan II, 20 470 Casablanca, Morocco.

Abstract

This study evaluated the biostimulant potential of humic substances extracted from municipal solid waste compost on the germination of tomato (*Solanum lycopersicum*) and alfalfa (*Medicago sativa*). Humic substances were applied at concentrations ranging from 50 to 500 mg.L⁻¹, and their effects were assessed using the germination index. The 100 mg.L⁻¹ treatment was the most effective, with germination indices of 151–179% for alfalfa and 163–184% for tomato. Higher concentrations reduced the stimulatory effect without causing phytotoxicity. These findings demonstrate that compost-derived humic substances are promising natural biostimulants, with 100 mg.L⁻¹ identified as the optimal concentration to enhance seed germination and support sustainable agricultural practices through municipal solid waste valorization.

Keywords: Humic substances; Phytotoxicity; *Medicago sativa*; *Solanum lycopersicum*.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OIL-COLLECTING CAPACITY OF NI AND CO-CONTAINING SURFACE-ACTIVE COMPOSITIONS SYNTHESIZED ON THE BASIS OF TECHNICAL PETROLEUM ACIDS IN OIL–WATER SYSTEMS

Hasanov Elgun Kamil

Institute of Petrochemical Processes named after Yu.H. Mammadaliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

Email: elgun.hasanzade02@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2878-3567>

Tamrazli Tamkin Tamraz

Institute of Petrochemical Processes named after Yu.H. Mammadaliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6347-5564>

Alizade Rufana Asif

Institute of Petrochemical Processes named after Yu.H. Mammadaliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

Email: alizada.rufana@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3400-5381>

Gasimov Vugar Jafar

Institute of Petrochemical Processes named after Yu.H. Mammadaliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

Email: vugargasimov19@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3826-599X>

Abbasova Khayala Adil

Institute of Petrochemical Processes named after Yu.H. Mammadaliyev, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6622-502X>

Abstract

This study investigates the effect of Ni- and Co-containing surface-active compositions synthesized from different temperature fractions of technical petroleum acids on the collection of Salyan crude oil from a water surface. The reagents were tested as compositions consisting of metal salts prepared from fractions separated at temperature ranges of 200–280°C, 280–340°C, and 340–410°C, combined with isopropyl alcohol (IPA). Experiments were conducted in both technical water and seawater environments. The diameter of the oil slick was measured immediately after reagent addition, as well as after 24, 56, and 104 hours, and oil-collecting efficiency was evaluated as a percentage. The results showed that all investigated compositions significantly reduced the diameter of the oil slick and ensured the accumulation of oil in a more compact area. The highest performance was observed in the Ni salt-containing composition synthesized from IPA and the 200–280°C fraction of technical petroleum acids (TPA); the efficiency of this sample was 69.80% in technical water and 66.67% in seawater. Compositions based on Co salts also demonstrated high oil-collecting capacity; in particular, the Co-containing system based on the 340–410°C fraction showed 65.56% efficiency in seawater. It was determined that although the high mineralization of seawater has a certain effect on the activity of the reagents, it does not significantly reduce their overall oil-collecting capacity. Time-based observations showed no substantial change in the diameter of the oil slick, indicating that the collecting effect remained stable. Thus, Ni- and Co-based surface-active compositions can be considered promising reagents for the collection of oil dispersed on a water surface.

Keywords: technical petroleum acids, Ni salts, Co salts, surface-active compositions, oil-collecting capacity, technical water, seawater.

APPLICATION OF PSO-OPTIMIZED PID CONTROLLER TO NON-LINEAR DYNAMIC SYSTEMS

Samir Badiyev

Azerbaijan Technical University, Department of Engineering Mathematics and Artificial Intelligence,
Baku-Azerbaijan

Email: samir.badiyev@aztu.edu.az

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-6192-4132>

Samad Safarov

Azerbaijan Technical University, Department of Engineering Mathematics and Artificial Intelligence,
Baku-Azerbaijan

Email: semedseferov1111@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-1168-3382>

Abstract

This paper proposes a Particle Swarm Optimization (PSO)-based PID controller tuning methodology applied to two distinct nonlinear dynamic systems: a photovoltaic (PV) maximum power point tracking (MPPT) system and an unmanned aerial vehicle (UAV) under variable aerodynamic conditions. Both systems exhibit highly nonlinear characteristics that make conventional fixed-parameter PID controllers insufficient for achieving optimal performance under changing operating conditions. In PV systems, fluctuations in solar irradiance and cell temperature continuously shift the maximum power point, while in UAV systems, aerodynamic disturbances and wind variations introduce significant dynamic uncertainties that degrade control performance. To address these challenges, a PSO algorithm is employed to automatically tune the three PID controller parameters — proportional gain (K_p), integral gain (K_i), and derivative gain (K_d) — by minimizing a multi-objective cost function that incorporates integral square error (ISE), peak overshoot (M_p), and settling time (t_s). The proposed methodology is implemented and validated through MATLAB/Simulink simulations for both systems independently, followed by a comparative analysis against conventionally tuned PID controllers. Simulation results demonstrate that the PSO-optimized PID controller achieves superior transient and steady-state performance in both applications, exhibiting reduced overshoot, faster settling time, and improved disturbance rejection compared to classical PID tuning methods such as the Ziegler-Nichols approach. The findings confirm that the proposed PSO-PID framework offers a robust, flexible, and computationally efficient solution for controlling nonlinear dynamic systems across diverse engineering domains.

Keywords: Keywords—PSO, PID Controller, Photovoltaic System, and MPPT, UAV.

STRATEGIES FOR EMISSION REDUCTION IN INDUSTRIAL STEAM GENERATION SYSTEMS

Mohamed EL MORSY

PhD student (Responsible Author)

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3979-1940>

mohamed.elmorsy.41@edu.uiz.ac.ma

Laila AFIA

Prof. Dr., Ibnou Zohr University, Faculty of Sciences, Department of chemistry, Laboratory of Materials and

Environment (LME)

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-6324-8396>

lafia@uiz.ac.ma

ABSTRACT

Fire-tube steam boilers are widely used in industrial facilities due to their reliability, operational simplicity, and ability to meet thermal energy demands. However, inefficient combustion conditions and inadequate operating practices can lead to excessive atmospheric emissions, including carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and particulate matter, while also reducing overall energy efficiency. These emissions contribute to environmental pollution and increase operational costs associated with fuel consumption. This study investigates the optimization of flue gas emissions from fire-tube steam boilers through the analysis and control of key operating parameters, including excess air ratio, combustion temperature, fuel quality, burner adjustment, and heat recovery efficiency. The objective is to minimize pollutant emissions while maintaining optimal steam production and improving boiler performance. The proposed approach evaluates combustion efficiency, fuel consumption, flue gas composition, and thermal losses under different operating conditions. Particular attention is given to the implementation of combustion control strategies and energy recovery systems, such as economizers, to enhance heat utilization and reduce stack losses. Results demonstrate that proper optimization of combustion parameters can significantly decrease CO and NO_x emissions, improve fuel efficiency, and lower greenhouse gas emissions. Furthermore, continuous monitoring and process control contribute to stable boiler operation and reduced environmental impact. The optimization of fire-tube steam boiler emissions therefore represents an effective strategy for improving energy efficiency, reducing operational costs, and supporting sustainable industrial practices.

Keywords: fire-tube boiler, steam generation, combustion optimization, flue gas emissions, energy efficiency, NO_x reduction, environmental performance.

**FOSTERING LEARNER AUTONOMY IN TAFL: COGNITIVE MAPPING AND
INTERACTIVE MODALITIES IN THE BAREQ PLATFORM**

MANAR SOUHAIR

Mohammed V University, Hassan II University

SAMIRA ZAOUI

Mohammed V University, Hassan II University

MALEK SHAHWAN

Mohammed V University, Hassan II University

Abstract

The Teaching of Arabic as a Foreign Language (TAFL) is increasingly shifting from traditional grammar-translation models toward dynamic, digitally integrated environments. This review examines the pedagogical framework of Bareq, an engaging digital program designed to facilitate Modern Standard Arabic acquisition through self-paced and blended learning models. Explicitly aligned with global linguistic benchmarks, including the Common European Framework of Reference (CEFR) and the American Council on the Teaching of Foreign Languages (ACTFL), the platform offers a highly structured curriculum. The syllabus guides learners from foundational alphabet introduction through four distinct proficiency tiers (Beginner, Intermediate, Advanced, and Proficient) utilizing diagnostic placement testing to ensure appropriate scaffolding. To optimize student engagement and accommodate diverse learning styles, Bareq employs a multimodal approach that integrates educational animated videos, interactive activities, and gamification. Furthermore, the platform supports constructivist learning principles by encouraging learners to build interactive mind maps, which aid in the active synthesis of grammar and vocabulary. By providing comprehensive enrichment resources, such as grammar summaries and illustrated stories, alongside printable lesson plans for instructors, Bareq presents a versatile, comprehensive model for communicative competence in modern TAFL pedagogy.

THERMAL IMAGING TO DETECT PATHOGEN-INDUCED STRESS

Dr. K. VIGNESH

Assistant Professor, Palar Agricultural College, Vellore, Tamil Nadu, India
ORCID: 0000-0003-4484-3862

Abstract

Plant diseases cause significant reductions in crop productivity, making early and accurate diagnosis essential for sustainable disease management. Thermal imaging has emerged as a rapid, non-destructive, and non-invasive technique that detects pathogen-induced stress by measuring changes in leaf and canopy temperature before visible disease symptoms appear. Pathogen infection alters transpiration, stomatal conductance, and water movement within plant tissues, producing distinct thermal patterns that can be captured using infrared cameras. Recent advancements in thermal sensors, unmanned aerial vehicles (UAVs), artificial intelligence (AI), and machine learning have enhanced the accuracy of thermal imaging for detecting fungal, bacterial, viral, and oomycete diseases under both laboratory and field conditions. Integrating thermal imaging with multispectral and hyperspectral imaging further improves disease detection and enables precise disease monitoring and targeted management practices. Although environmental factors such as temperature, humidity, and solar radiation can influence thermal measurements, ongoing developments in sensor technology and AI-based image analysis are improving the reliability of this approach. Thermal imaging represents a promising tool for precision agriculture by enabling early disease detection, reducing unnecessary pesticide applications, and promoting sustainable crop protection.

Keywords: Thermal imaging; Infrared thermography; Plant disease detection; Pathogen-induced stress; Precision agriculture; Artificial intelligence; UAV; Sustainable agriculture.

VITAMIN D, CALCIUM, AND PROSTATE CANCER AMONG AFRICAN MEN: A REVIEW

Adekola Saheed A.*

Department of Medical Laboratory Science, Faculty of Allied Health Sciences, College of Health Sciences, University of Abuja, Abuja, Nigeria
Centre for Community Health and Systems Support, University of Abuja, Nigeria
saheed.adekola@uniabuja.edu.ng

Yahaya Gobir Kola

Department of Medical Biochemistry, College of Health Sciences, University of Abuja, Abuja, Nigeria
Centre for Community Health and Systems Support, University of Abuja, Nigeria

Musah Khadijat Toyin

Department of Community and Public Health Nursing, Faculty of Nursing Science, Federal University, Otuoke, Nigeria
Centre for Community Health and Systems Support, University of Abuja, Nigeria

Olaniyan Mathew Folaranmi

Department of Medical Laboratory Science, Faculty of Allied Sciences, Edo State University, Iyaho, Nigeria

Oparinde Dolapo Pius⁵

Department of Chemical Pathology, College of Health Sciences, Ladoke Akintola University of Technology, Ogbomoso, Nigeria.

Abstract

Background: Prostate cancer represents a significant health disparity, with men of African ancestry experiencing substantially higher incidence and mortality rates compared to other racial/ethnic groups. Emerging evidence suggests that vitamin D deficiency and calcium dysregulation may contribute to these disparities. **Objective:** This comprehensive review examines the complex relationships between vitamin D status, calcium metabolism, and prostate cancer risk and aggressiveness in African men, with emphasis on the underlying biological mechanisms and potential interventions. **Methods:** A systematic literature search was conducted across multiple databases (PubMed, Scopus, Web of Science) from 2000 to 2024. We included original research articles, systematic reviews, meta-analyses, and clinical studies examining vitamin D, calcium, and prostate cancer in populations of African ancestry. **Results:** Vitamin D deficiency is highly prevalent among men of African ancestry, with multiple studies demonstrating inverse associations between serum vitamin D levels and aggressive prostate cancer. In African American men, vitamin D deficiency significantly increased the risk of aggressive disease. High calcium intake modified this association, with combined vitamin D deficiency and high calcium showing substantially elevated risk for aggressive prostate cancer. Studies from Jamaica demonstrated that vitamin D deficiency at diagnosis predicted both all-cause mortality and prostate cancer-specific mortality. Mechanistic studies reveal that vitamin D regulates prostate androgen levels through megalin-mediated pathways, with prostatic dihydrotestosterone levels being higher in African American men and inversely correlated with serum vitamin D status. The vitamin D receptor genetic polymorphisms, particularly Cdx-2, modify the relationship between calcium intake and prostate cancer risk in African populations. **Conclusions:** Vitamin D deficiency represents a modifiable risk factor that may contribute to prostate cancer disparities in African men. The interaction between vitamin D status, calcium intake, and genetic factors suggests opportunities for precision prevention strategies. However, randomized controlled trials specifically in African populations are urgently needed to establish causality and optimize intervention strategies.

Keywords: Vitamin D; calcium; prostate cancer; African ancestry; health disparities; megalin; vitamin D receptor; androgen metabolism

**HIERARCHICAL BLOCKCHAIN-BASED SECURITY FRAMEWORK FOR ON-DEMAND
IOT SERVICES IN CLOUD-ASSISTED HEALTHCARE**

Djenaoui Abdelatif

Faculty of Sciences, Computer Science Department, LRSD, University Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif
19000, Algeria

Reffad Hamza

Faculty of Sciences, Computer Science Department, LRSD, University Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif
19000, Algeria

Alti Adel

Faculty of Sciences, Computer Science Department, LRSD, University Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif
19000, Algeria

Abstract

The proliferation of Internet of Things (IoT) devices in critical domains such as healthcare has intensified reliance on cloud computing infrastructures for data storage, processing, and on-demand service delivery. However, the centralized nature of conventional cloud architectures introduces significant vulnerabilities, including single points of failure, unauthorized data access, and limited transparency in service provisioning, particularly when handling sensitive patient vitals and identity information. This paper presents a hierarchical blockchain-based framework for securing IoT-cloud integration in on-demand healthcare services. The proposed architecture decouples trust management across multiple tiers, combining lightweight elliptic curve cryptography (ECC) for resource-constrained edge devices with blockchain-anchored access control and auditability at the cloud layer. By distributing cryptographic verification and service authorization across this hierarchy, the system mitigates the risks of centralized compromise while preserving the low-latency requirements of real-time IoT data streams. We detail the system's key components, including device-level encryption, smart-contract-mediated service negotiation, and a consensus mechanism tailored to the heterogeneous trust levels of IoT nodes, cloud servers, and end users. A prototype implementation, comprising a backend service layer and a mobile client for vitals simulation and monitoring, demonstrates the framework's feasibility under realistic healthcare workflows. Experimental evaluation indicates that the proposed approach achieves improved resistance to common attack vectors (e.g., data tampering, replay, and unauthorized access) compared to traditional cloud-only models, while maintaining acceptable computational and communication overhead for constrained IoT environments. These results suggest that hierarchical blockchain integration offers a viable path toward secure, scalable, and transparent on-demand IoT services in cloud-assisted healthcare systems.

Keywords: *Internet of Things (IoT); Cloud Computing; Blockchain; Security; Elliptic Curve Cryptography (ECC); Healthcare; Smart Contracts; Access Control.*

**ENERGY MARKET VOLATILITY, FOSSIL FUEL DEPENDENCE, AND STOCK MARKET
CRASH RISK**

Prof. Lovleen Gupta

Department of Commerce Hindu College, University of Delhi

ORCID ID: 0000-0002-3028-6471

Email ID: lgupta@hinducollege.du.ac.in

Mr. Santosh Kumar

Department of Commerce Faculty of Commerce and Business, Delhi School of Economics, University
of Delhi

ORCID ID: 0009-0008-8197-9754

Email ID: skumar2425@commerce.du.ac.in

Abstract

This paper investigates how energy market volatility feeds into stock market volatility in terms of the risk of stock markets crashing, and conducts the analysis on a daily time scale for fourteen economies grouped as oil exporters, low-renewable oil importers, and high-renewable oil importers from January 2016 to January 2026. Using three complementary methods. The Diebold-Yilmaz connectedness framework shows that 34.33 percent of the variance of the system-wide forecast error is explained by cross-market transmission, which was particularly high during the COVID-19 pandemic, the Russia-Ukraine conflict, and the European energy crisis. Country fixed effects panel regressions find that the CBOE Crude Oil Volatility Index has a statistically significant impact on change in crash risk ($p < 0.001$), but that country-aggregate renewable energy share does not. The XGBoost Classifier has a mean AUC of 0.660 for predicting a crash event 1 week in advance, which outperforms a logistic regression benchmark model with a mean AUC of 0.650. An analysis of SHAP components shows that differences in structurally important crash drivers of groups are driven by the sensitivity of group members to commodity dynamics for oil exporters, currency channels for low-renewable importers, and lagged crash persistence for high-renewable importers. The results of this study define energy uncertainty as a measurable measure of equity tail risk and create a deployable early-warning tool for macroprudential surveillance.

Keywords: energy market volatility, stock market crash risk, renewable energy transition, financial stability.

FROM PUBLIC FINANCE TO CORPORATE FINANCE: INFLUENCE OF GREEN MUNICIPAL BONDS (GMB) ISSUANCE ON THE FINANCIAL STRUCTURE OF INDIAN MUNICIPAL CORPORATIONS

Amit Kumar Singh

Professor, Department of Commerce, Delhi School of Economics, University of Delhi, New Delhi, 110001, India

Lovleen Gupta

Professor, Department of Commerce, Hindu College, University of Delhi, New Delhi, 110001, India

Mamta Dhanda*

Maharshi Kanad Post Doctoral Fellow, Institution of Eminence, University of Delhi, New Delhi, 110001, India (Corresponding author)
Email: dhandamamtain396@gmail.com

Abstract

India's transition from cash-based to accrual accounting in Urban Local Bodies (ULBs), formalized through regulatory reforms, has opened a new institutional space at the intersection of public and corporate finance. As Indian municipal corporations increasingly turn to capital markets through Green Municipal Bond (GMB) issuances, they encounter governance pressures historically associated with corporate debt markets, including creditor monitoring, disclosure obligations, and credit rating scrutiny, while still operating under the soft budget constraints, multiple-principal accountability structures, and intergovernmental transfer dependence characteristic of public sector entities. This study examines how GMB issuance influences the financial reporting behavior and financial structure of Indian municipal corporations, situating the inquiry within agency theory, the bonding hypothesis, and institutional isomorphism frameworks drawn from both public sector and corporate finance literature. While prior research, notably on US municipalities, has bond issuances as a transient, pre-issuance phenomenon followed by reduced discretion, India's nascent municipal bond market, characterized by weak investor sophistication, limited credit rating coverage, and high information asymmetry, may impose comparatively stronger and more sustained governance discipline. Adopting an interpretive, qualitative case study design, the research draws on seven Indian municipal corporations that have issued green bonds, analyzing annual financial statements, bond offer documents, credit rating reports, use-of-proceeds and impact reports, auditor and CAG observations, and official interviews, coded thematically using MAXQDA. By tracing how accrual-based reporting, regulatory mandates as per SEBI's 2015 municipal debt regulations, and market entry reshape financial disclosure and discretion in ULBs, the study addresses a significant gap in the literature, which remains heavily concentrated on developed-market municipal bond contexts. The findings aim to contribute a theoretically grounded, emerging-market perspective on the governance consequences of municipal bond issuance, with implications for policymakers, regulators, and credit market participants engaged in financing urban green infrastructure in India.

Keywords: Green Municipal Bonds; Urban Local Bodies; Accrual Accounting; Municipal Finance; Emerging Markets; India; Public Sector Governance

ANTIMICROBIAL RESISTANCE, VIRULENCE GENE PROFILING, AND GENETIC DIVERSITY OF MULTIDRUG-RESISTANT *Pseudomonas aeruginosa* isolates in MAZANDARAN, IRAN

Ghazaleh Elahi

Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan, Iran

Mehrdad Gholami

Department of Microbiology and Virology, Faculty of Medicine, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

Abstract

Pseudomonas aeruginosa is a major cause of healthcare-associated infections (HAIs), particularly in immunocompromised patients, leading to high morbidity and mortality rates. This study aimed to investigate the antimicrobial resistance patterns, virulence gene profiles, and genetic diversity among *P. aeruginosa* isolates from hospitalized patients in Mazandaran, Iran. From September 2021 to April 2022, 82 non-duplicate *P. aeruginosa* isolates were collected from diverse clinical sources. Identification was confirmed using API 20 NE (bioMérieux, Marcy l'Etoile, France). Antimicrobial susceptibility testing was conducted using the Kirby-Bauer disk diffusion method according to CLSI guidelines to assess resistance to a range of antibiotics. The virulence profile (*exoT*, *exoY*, *exoU*, *toxA*, *plcH*, *plcN*, *algD*, *aprA*, *lasB* and *exoS*) of each *P. aeruginosa* isolate was determined by PCR. The genetic diversity among the strains was evaluated using the random amplification of polymorphic DNA (RAPD) technique. Clustering was based on a Dice similarity coefficient of $\geq 85\%$. Of the 82 total strains, *P. aeruginosa* exhibited the highest and lowest resistance toward ticarcillin-clavulanate (98.78%) and colistin (0%), respectively. Moreover, 100% of the *P. aeruginosa* isolates were MDR. The following prevalence of virulence factor genes was observed: *aprA*, *lasB*, *algD*, *toxA*, *plcH*, *exoY*, and *exoT* in 100% of isolates. The *plcN*, *exoS*, and *exoU* were identified 98.78%, 67.07%, and 45.12%, respectively. The RAPD patterns obtained with primers 272 and 208 had respectively 2–19 and 6–17 bands. According to the Dice similarity coefficient of higher than 85%, 56 and 39 clusters were recognized. The high rate of multidrug resistance combined with the widespread presence of virulence genes in *P. aeruginosa* isolates highlights the potential for increased infection severity, morbidity, and mortality in hospitalized patients. The substantial genetic diversity observed among isolates suggests that *P. aeruginosa* in this region may rapidly evolve, necessitating ongoing surveillance and more targeted antimicrobial strategies.

**ANTIMICROBIAL PHOTODYNAMIC EFFECT OF THE PHOTOSENSITIZER
RIBOFLAVIN, ALONE AND IN COMBINATION WITH COLISTIN, AGAINST PANDRUG-
RESISTANT PSEUDOMONAS AERUGINOSA CLINICAL ISOLATES**

Ghazaleh Elahi

Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan,
Iran

Abdollah Ardebili

Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan,
Iran

Abstract

Development of multi-, extensively-, and pandrug-resistant (MDR, XDR, and PDR) strains of *Pseudomonas aeruginosa* remains a major problem in medical care. The present study evaluated the effect of antimicrobial photodynamic therapy (aPDT) as a monotherapy and in combination with colistin against *P. aeruginosa* isolates. Two *P. aeruginosa* isolates recovered from patients with respiratory tract infections were examined in this study. Minimum inhibitory concentration (MIC) of colistin was determined by the colistin broth disk elution (CBDE) and the reference broth microdilution (rBMD) methods. aPDT was performed using the photosensitizer (Ps) riboflavin at several concentrations and a light-emitting diode (LED) emitting blue light for different irradiation times with or without colistin at $1/2 \times \text{MIC}$ concentration. Both PA1 and PA2 isolates were identified as colistin-resistant *P. aeruginosa* with a MIC ≥ 4 $\mu\text{g/mL}$ by the CBDE and MICs of 512 $\mu\text{g/mL}$ and 256 $\mu\text{g/mL}$, respectively, by the rBMD. In aPDT, neither riboflavin nor LED light alone had antibacterial effects. The values of colony forming units per milliliter (CFU/mL) in both isolates were significantly reduced by LED + Ps treatments in a time-dependent manner (LED irradiation time) and dose-dependent manner (Ps concentration). In comparison with control, treatment with Ps (50 μM) + LED (120 s) and Ps (100 μM) + LED (120 s) resulted in 0.27 $\log_{10}$ CFU/mL and 0.43 $\log_{10}$ CFU/mL reductions in PA1, and 0.28 $\log_{10}$ CFU/mL and 0.34 $\log_{10}$ CFU/mL reductions in PA2, respectively, ($P < 0.01$). The best results were obtained after the combination of aPDT followed by colistin, which increased bacterial reduction, resulting in a 0.41-0.7 $\log_{10}$ CFU/mL reduction for PA1 and 0.35-0.83 $\log_{10}$ CFU/mL reduction for PA2 ($P = 0.001$). This study suggests the potential implications of aPDT in combination with antibiotics, such as colistin for treatment of difficult-to-treat *P. aeruginosa* infections.

CERVICAL CANCER PREVENTION AND HPV VACCINATION

R. Devadharshini

Faculty of pharmacy, Bharath institute of higher education and research, Chennai-600073, India

Meenatchi.S

Faculty of pharmacy, Bharath institute of higher education and research, Chennai-600073, India

Gomathy E

Faculty of pharmacy, Bharath institute of higher education and research, Chennai-600073, India

Dr. W. Helen

Faculty of pharmacy, Bharath institute of higher education and research, Chennai-600073, India

Abstract

Cervical cancer remains one of the leading causes of cancer-related morbidity and mortality among women worldwide, particularly in low- and middle-income countries. Persistent infection with high-risk types of Human Papillomavirus (HPV), especially HPV-16 and HPV-18, is the primary etiological factor in the development of cervical cancer. The progression from HPV infection to invasive carcinoma is typically slow, occurring over several years through identifiable precancerous stages, which makes cervical cancer highly preventable through effective public health interventions. Primary prevention focuses on prophylactic HPV vaccination. Currently available vaccines, such as Gardasil and Cervarix, provide strong protection against the most oncogenic HPV types. These vaccines are most effective when administered prior to exposure to the virus, ideally between 9 and 14 years of age. Extensive clinical trials and post-marketing surveillance have demonstrated that HPV vaccines are safe, immunogenic, and capable of significantly reducing the incidence of high-grade cervical intraepithelial neoplasia and cervical cancer. Secondary prevention includes regular cervical screening through Pap smear testing and HPV DNA testing, which enables early detection and treatment of precancerous lesions before progression to invasive disease. Integration of vaccination and screening programs has shown substantial reductions in cervical cancer incidence in countries with high coverage rates. The World Health Organization has launched a global strategy to eliminate cervical cancer as a public health problem, targeting 90% vaccination coverage of girls by age 15, 70% screening coverage of women, and 90% treatment access for those diagnosed with cervical disease. Achieving these targets requires improved awareness, equitable access to vaccines, strengthened healthcare infrastructure, and policy-level commitment. In conclusion, cervical cancer is a largely preventable malignancy through a combination of HPV vaccination, routine screening, and timely treatment. Expanding vaccination programs and enhancing public health education are critical steps toward reducing the global burden of cervical cancer and moving closer to its elimination.

Keywords: Cervical cancer, Human Papillomavirus (HPV), HPV vaccination, Gardasil, Cervarix, Pap smear, HPV DNA testing, cervical intraepithelial neoplasia (CIN), women's health, cancer prevention, immunization programs, public health, screening strategies, World Health Organization, global health initiatives.

**ALGORITHMIC FINANCIAL LITERACY: A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR
INTEGRATING AI INTO PERSONAL FINANCIAL PLANNING**

Prof. Amit Kumar Singh

Department of Commerce, Faculty of Commerce and Business, Delhi School of Economics,
University of Delhi, Delhi, India
ORCID ID: 0000-0002-8095-7237
Email ID: aksingh1@commerce.du.ac.in

Mr. Mukesh Kumar

Department of Commerce, Faculty of Commerce and Business, Delhi School of Economics,
University of Delhi, Delhi, India
ORCID ID: 0009-0006-3042-309X
E-mail ID: mukesh@commerce.du.ac.in
(corresponding Author)

Abstract

Financial literacy is a key constraint to economic development, and it has shown limited improvement despite the rapid digitization of financial services worldwide, particularly in emerging markets. Retail investors often exhibit a strong aversion to losses when choosing between traditional investment vehicles, such as fixed deposits, and alternatives that offer superior returns in growth phases, including mutual funds and Systematic Investment Plans (SIPs). Financial education is traditionally static and does not address, mitigate, or eliminate the behavioral biases that create inefficiencies in asset allocation. To address this gap, this paper outlines a theoretical basis for implementing artificial intelligence (AI) as an active educational tool in personal financial planning. Through a systematic conceptual synthesis of secondary literature spanning behavioral finance, educational economics, and financial technology (FinTech), this study introduces the concept of "*Algorithmic Financial Literacy*" (AFL). The proposed framework encompasses an AI Intervention Layer capable of delivering personalized behavioral nudges through real-time conversational interfaces. These algorithmic interventions can help inform investors on how best to navigate the psychological challenges of moving from the traditional savings paradigm to market-driven investment vehicles such as Systematic Investment Plans (SIPs) and mutual funds, by counteracting the cognitive biases identified in prospect theory. This paper argues that FinTech should evolve from a passive "robo-advisory" function into a powerful, dynamic, personalized learning instrument. The implications of such an approach are tremendous with regard to "financial inclusion", where algorithmic financial literacy can release "*dormant retail wealth*", maximize individual wealth outcomes, and ultimately lead to sustainable macroeconomic growth.

Keywords: Algorithmic Financial Literacy, Artificial Intelligence, Behavioral Finance, Retail Investment, Economic Development.

**ELECTROPHILICITY AS A PREDICTOR OF BIOACTIVITY: CHEMICAL REACTIVITY
STUDY OF ORGANOTIN(IV) 4-NITROBENZOATE COMPOUNDS USING CYCLIC
VOLTAMMETRY**

Atikah Suwanda, S.Si.

University of Lampung, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Department of Chemistry,
35145 Bandar Lampung, Indonesia

Prof. Dr. Hardoko Insan Qudus, M.S.

University of Lampung, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Department of Chemistry,
35145 Bandar Lampung, Indonesia
ORCID ID: 0000-0003-3317-6806

Prof. Sutopo Hadi, M.Sc., Ph.D.

University of Lampung, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Department of Chemistry,
35145 Bandar Lampung, Indonesia
ORCID ID: 0000-0001-6464-7215

Abstract

Organotin(IV) carboxylates continue to attract interest as versatile bioactive agents with reported antibacterial, antifungal, antimalarial, disinfecting, and anticancer activities. Their bioactivity is largely governed by the electrophilic character of the tin(IV) center, which determines the strength of interaction with nucleophilic biological targets such as DNA and proteins. In this study, the chemical reactivity of three organotin(IV) 4-nitrobenzoate derivatives, namely dibutyltin(IV) di-4-nitrobenzoate (2), diphenyltin(IV) di-4-nitrobenzoate (3), and triphenyltin(IV) 4-nitrobenzoate (4), was investigated using cyclic voltammetry at scan rates of 100 - 700 mV/s. Forward chemical reaction rate constants (k_f) were obtained by digital simulation using Polar 5.8.3 software, and chemical reactivity was evaluated from the slope of the linear relationship between k_f and scan rate (v). All compounds exhibited an E_qC_i mechanism, consisting of a quasi-reversible electron-transfer step followed by an irreversible chemical reaction. Compound 4 displayed significantly higher chemical reactivity, with a k_f/v slope of 8.1472 V⁻¹, compared with compounds 2 and 3, which showed values of 3.7403 and 3.9293 V⁻¹, respectively. This trend is attributed to the electron-withdrawing effect of the phenyl substituents, which enhances the electrophilicity of the tin center and its tendency to interact with nucleophiles. The observed reactivity order parallels structure - activity trends reported for related organotin carboxylates, suggesting that tin-center electrophilicity may serve as a useful predictor of biological potency. These findings provide a mechanistic basis for the design and selection of organotin(IV) 4-nitrobenzoate compounds for further biological evaluation.

Keywords: Organotin(IV) 4-nitrobenzoate, cyclic voltammetry, polar 5.8.3 software, chemical reactivity, forward chemical reaction rate constant (k_f).

IMPORTANCE OF HOOF HEALTH IN CATTLE MILK PRODUCTION

MSc Ivanka Hadžić

Association of Trimmers, Care and Therapy of Cattle Foot of Serbia, 11000 Belgrade, Serbia
redvanja@gmail.com
ORCID 0009-0005-3032-0173

Prof Dr Ivan Pavlović

Scientific Institute of Veterinary Medicine of Serbia, 11000 Belgrade, Serbia
dripavlovic58@gmail.com
ORCID 0000-0003-4751-6760

ABSTRACT

In modern livestock production, where maximum efficiency and sustainability are sought, cattle health is the foundation of success. Among the many aspects of animal care, hoof care often remains under-recognized as a critical component of overall health and productivity. However, experience and scientific research clearly show that healthy hooves are essential for animal welfare and economic profitability of the farm. Hoof disorders, also known as lameness, are one of the most common health problems in cattle worldwide. They can lead to significant losses in milk and meat production, reduced fertility, increased medical costs and premature culling of animals from the herd. The economic consequences of lameness are multiple and serious. They include reduced milk production, with losses estimated at 270 to 574 kg per cow per lactation, or as much as €890 to €1078 per 305-day lactation in severe cases. Lameness also leads to reduced fertility, an extended period from calving to conception, resulting in higher feed and reproduction costs. Treatment and labor costs are also increasing, including papilloma pruning, antibiotic therapy, bandages and blocks. Finally, lameness significantly increases the cow's risk of culling, where foot ulcers can increase the risk of culling by as much as 56%. An average case of sole ulcer can cost a farm around €374. The etiology of hoof disease is multifactorial, resulting from a complex interaction of nutrition, disease, genetics, management practices, and environmental factors. There is also a complex relationship between the physiological and metabolic demands of lactation and their profound impact on the health of the papilla, with particular reference to the key role of the fat pad (digital pad). Understanding these complex relationships is critical to developing effective prevention and control strategies. Regular and professional hoof care, on the other hand, helps prevent these problems, ensuring your animals remain active, pain-free and productive.

Key words: hoof health, cattle, milk production

**CYBERSECURITY IN INTELLIGENT PUBLIC TRANSPORT SYSTEMS IN ALBANIA:
CHALLENGES, RISKS, AND A SECURE ITS FRAMEWORK**

Dr(c). Grigorina Boce

Mediterranean University of Albania, Faculty Informatics

Email: grigorina.boce@umsh.edu.al

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-9902-0715>

Abstract

The rapid digital transformation of public transportation systems has significantly improved operational efficiency, passenger safety, and service quality. Intelligent Transportation Systems (ITS) integrate information and communication technologies, Internet of Things (IoT) devices, cloud computing, Global Positioning Systems (GPS), and Artificial Intelligence (AI) to optimize transportation services. However, increased connectivity also introduces cybersecurity vulnerabilities that may compromise critical infrastructure, passenger information, and transportation operations. This study investigates cybersecurity challenges associated with Intelligent Public Transport Systems in Albania and proposes a secure ITS framework adapted to the Albanian transportation environment. A quantitative research methodology was employed using a risk-based assessment model, statistical analysis, and comparative evaluation with neighboring Balkan countries. Simulated operational data from public transportation networks were analyzed to evaluate cyber threat trends, incident frequency, and security maturity levels. Results indicate that cyber threats targeting transportation infrastructure have increased considerably during the digitalization process, while cybersecurity readiness remains at a moderate level. The proposed framework integrates network segmentation, intrusion detection systems, encrypted communication protocols, AI-based threat monitoring, and centralized security governance. Findings provide practical recommendations for policymakers, transport operators, and governmental institutions seeking to improve cyber resilience in Albania's smart mobility ecosystem.

Keywords: Cybersecurity, Intelligent Transportation Systems, ITS, Public Transport, Smart Mobility, Internet of Things, Artificial Intelligence, Albania.

FULL TEXTS

**DETAILED DYNAMIC CHARACTERIZATION OF *Candida parapsilosis* BIOFILM
FORMATION AND DEVELOPMENT USING SURFACE ENHANCED RAMAN
SPECTROSCOPY (SERS)**

Mihrinur YAPICI (ORCID: 0000-0003-2690-2769)

Institute of Science, Biotechnology and Biosafety the Department Eskisehir Osmangazi University,
Eskisehir, Turkey

Email: mihrinuryapici@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2690-2769>

Doç. Dr. Bükay YENİCE GÜRSU (ORCID: 0000-0002-6822-3484)

Central Research Laboratory Application and Research Center, Eskisehir Osmangazi University,
Eskisehir, Turkey

Email: bgursu@ogu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6822-3484>

Dr. Kürşad Osman AY (ORCID: 0000-0002-3133-1908)

Central Research Laboratory Application and Research Center, Eskisehir Osmangazi University,
Eskisehir, Turkey

Email: koay@ogu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3133-1908>

Doç. Dr. Betül YILMAZ ÖZTÜRK (ORCID: 0000-0002-1817-8240)

Central Research Laboratory Application and Research Center, Eskisehir Osmangazi University,
Eskisehir, Turkey

Email: byozturk@ogu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

Prof. Dr. İlknur DAĞ (ORCID: 0000-0002-7352-8653)

Vocational Health Services High School, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey

Email: ildag@ogu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7352-8653>

Abstract

Biofilm-associated fungal infections, in immunocompromised individuals, exhibit increasing resistance to treatment and pose a threat to public health. *C. parapsilosis* is an opportunistic pathogen that plays a significant role in hospital-acquired infections, particularly by forming biofilms on medical device surfaces. Many methods used to detect biofilm presence involve time-consuming and difficult sample preparation. Surface Enhanced Raman spectroscopy (SERS) offers rapid, reliable, and relatively more practical results compared to traditional techniques in elucidating biofilm structure. In this study, biochemical changes occurring at different stages (8, 24, and 48 hours) of *C. parapsilosis* biofilm development were characterized using SERS, and time-dependent changes were compared. Our data indicate that at 8 hours, protein and amide-related bands (1590 and 1695 cm⁻¹) are dominant, indicating active adhesion and metabolically active early biofilm formation; at 24 hours, a transition phase is characterized by the simultaneous detection of protein and polysaccharide-related signals, initiating metabolic activity and extracellular polymeric substance (EPS) production; and at 48 hours, strong increases in bands 955, 1029, 1246, 1328, 1393, and 1458 cm⁻¹ support significant EPS accumulation, matrix maturation, lipid rearrangement, and increased biofilm complexity. The relative decrease in the 1590 cm⁻¹ band during maturation reflects a transition from adhesion-dominant processes to a mature, EPS-rich biofilm architecture. SERS has significant potential and advantage in elucidating the biochemical dynamics that occur during biofilm formation and development.

Keywords: *Candida parapsilosis*, biofilm, SERS

1. Introduction

C. parapsilosis is an opportunistic fungus increasingly associated with bloodstream, catheter-related infections, and hospital-acquired outbreaks, particularly in immunocompromised patients and neonates. One of the main virulence factors contributing to the pathogenicity of *C. parapsilosis* is its ability to form biofilms on both biotic and abiotic surfaces (Trofa et al., 2008). Biofilm formation ensures fungal survival by increasing resistance to antifungal agents, providing protection from host immune responses, and enhancing persistence on medical devices. Therefore, understanding the biochemical dynamics underlying biofilm development is crucial for improving antifungal strategies and developing rapid diagnostic approaches.

Biofilm formation is a dynamic and highly organized process involving initial adhesion, microcolony formation, extracellular polymeric substance (EPS) production, and maturation into a complex structural architecture. Significant biochemical and structural changes occur in protein, polysaccharide, lipid, nucleic acid, and extracellular matrix components during these stages (Malinowska et al., 2023). Microscopic and biochemical analyses, frequently used in the study of fungal biofilms, provide important structural information; however, these approaches often involve time-consuming, labor-intensive processes requiring extensive sample preparation. Therefore, there is a need for rapid and sensitive analytical techniques that can monitor biochemical changes during biofilm maturation.

SERS is a highly sensitive analytical technique first discovered in 1974 following the observation of enhanced Raman signals from pyridine adsorbed on roughened silver electrodes, with the enhancement mechanism later clarified through electromagnetic and chemical contributions (Fleischmann et al., 1974). The SERS enhancement effect mainly arises from two mechanisms: the electromagnetic (EM) mechanism, which is considered the dominant contributor and originates from localized surface plasmon resonance (LSPR) generated on metallic nanostructures, and the chemical (CM) mechanism, which results from charge transfer interactions between the analyte molecules and the substrate surface. The synergistic contribution of these mechanisms can dramatically amplify Raman signals, enabling the detection of analytes at extremely low concentrations. Due to its high sensitivity, molecular specificity, rapid response, and minimal sample preparation requirements, SERS has been widely applied in various fields including biomedical diagnostics, pathogen identification, food safety monitoring, environmental analysis, and pharmaceutical studies. In recent years, SERS has attracted considerable attention as a promising tool for the detection and characterization of microbial systems and extracellular components because it allows rapid identification of biomolecular fingerprints with high sensitivity. Therefore, SERS-based approaches provide significant advantages for detecting and monitoring complex biological samples such as *C. parapsilosis* extracellular matrices and biofilms.

In fungal biofilms, early developmental stages are generally characterized by active adhesion processes and protein-dominant cellular activity, whereas mature biofilms exhibit increased EPS accumulation, polysaccharide enrichment, and structural stabilization. Monitoring these transitions spectroscopically may provide valuable insights into fungal biofilm maturation and resistance-associated phenotypes. In this context, SERS offers significant potential for distinguishing biofilm developmental stages through time-dependent biochemical signatures. Therefore, the aim of the present study was to investigate the biochemical changes occurring during *C. parapsilosis* biofilm development using SERS analysis at different maturation stages (8, 24, and 48 hours). By evaluating time-dependent spectral variations, this study aimed to characterize the transition from early adhesion to mature EPS-rich biofilm architecture and to assess the potential of SERS as a sensitive analytical tool for monitoring fungal biofilm maturation.

2. Materials and Methods

Preparation of yeast biofilms for three different time periods

In this study, the moderate biofilm-producing *C. parapsilosis* ATCC 22019 isolate stored at -80°C in the Biotechnology Laboratory of Eskişehir Osmangazi University ARUM was used. After activation in YPD medium at 37°C , the isolate was incubated in RPMI 1640 liquid medium at 37°C for 24 h. For standardization of experimental conditions, glass slides were aseptically arranged in sterile glass containers together with Yeast Peptone Dextrose (YPD) medium and sterilized prior to biofilm formation. An actively growing 24 h culture of *C. parapsilosis* ATCC 22019 was adjusted to 0.5 McFarland turbidity standard, and 100 μL of the standardized inoculum was transferred into sterile containers containing 50 mL YPD broth and the coated glass slides. The samples were then incubated

under appropriate conditions for biofilm development. At 8, 24 and 48 h of incubation, the glass slides were aseptically removed from the containers under sterile conditions. Non-adherent cells were removed by gently washing the slides three times with sterile distilled water. Subsequently, the biofilm formed on the slide surfaces was carefully scraped using a sterile cell scraper. The collected biofilm material was mixed with colloidal substrate at equal volume ratios and deposited layer-by-layer onto glass slides. After air drying, the prepared samples were subjected to SERS spectroscopic analysis (Ay et al., 2026).

Ag colloid synthesis

Silver colloids were synthesized using the citrate reduction method described by Lee and Meisel with slight modifications. Briefly, 90 mg of AgNO₃ was dissolved in 500 mL of deionized water and heated to boiling under continuous magnetic stirring. Subsequently, 10 mL of 1% (w/v) trisodium citrate solution was rapidly added to the boiling solution. The reaction mixture was maintained under vigorous stirring and boiling conditions for approximately 60 min, during which the color gradually changed from colorless to pale yellow and finally to grayish-yellow, indicating the formation of silver nanoparticles. After completion of the reaction, the colloidal suspension was allowed to cool naturally to room temperature under continuous stirring and stored in dark containers at 4 °C for further use (Lee et al., 1982).

SERS analysis

The SERS measurements were performed using Ag colloids mixed with *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm samples. Briefly, 100 µL of Ag colloid and 100 µL of *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm suspension were mixed thoroughly to facilitate interaction between the biofilm components and plasmonic nanoparticles. Subsequently, the resulting mixture was dropped onto a clean glass slide and allowed to dry under ambient conditions at room temperature. After drying completely, SERS measurements were carried out. SERS spectra were acquired using a 785 nm excitation laser with a laser power of 0.5%, employing a 20× objective lens. Spectral acquisition was performed over the range of 680–2000 cm⁻¹ with an exposure time of 20 s and 3 accumulations for each measurement. For the 8, 24, and 48 h. biofilm samples, 20 spectra were collected from different spatial regions of each sample to account for sample heterogeneity and improve reproducibility. Subsequently, the acquired spectra for each time point were averaged and used for further spectral analysis (Ay et al., 2026).

3. Findings and Discussion

This study aimed to reveal the possible time-dependent biochemical changes in *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm development using SERS analysis. For this purpose, average data obtained from 20 spectra at 8, 24, and 48 hours were used. SERS data are presented in Figure 1, colloid spectrum in Figure 2, and superimposed SERS and colloid spectrum in Figure 3. Possible assignments and biochemical origin investigation results for the SERS spectra obtained from the 8th, 24th, and 48th hours of *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm, based on literature data, are given in Table 1.

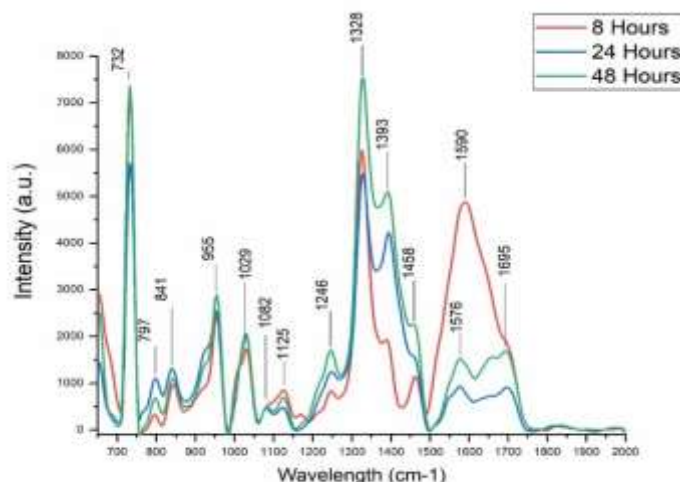


Figure 1. SERS data of *Candida parapsilosis* ATCC 22019 biofilm obtained at 8, 24 and 48 hours (Spectra was calculated by averaging 20 different measurements).

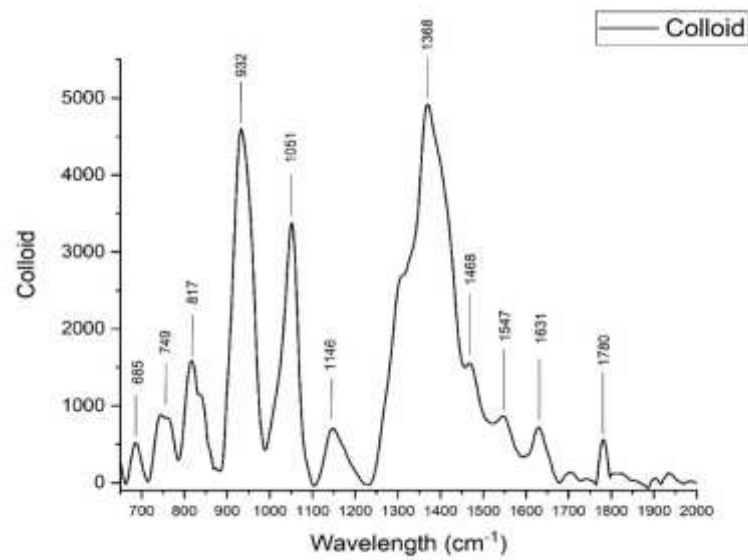


Figure 2. SERS spektrum of the colloid.

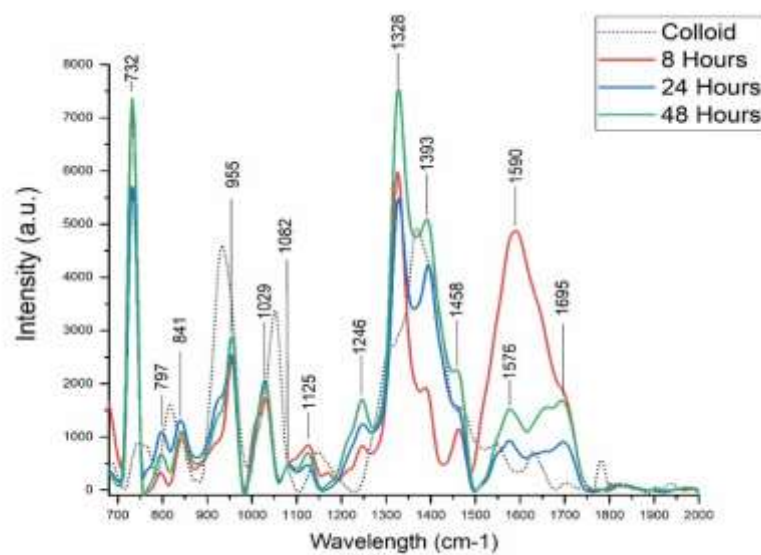


Figure 3. Overlapping spectra of colloid with SERS data obtained at 8, 24, and 48 hours of *Candida parapsilosis* ATCC 22019 biofilm.

Table 1. Prominent peaks observed in SERS spectra obtained from 8, 24, and 48 hours of *Candida parapsilosis* ATCC 22019 biofilm, possible assignments of chemical compounds and biochemical origins based on literature data.

Peak (cm ⁻¹)	Possible Assignment	Biochemical Origin
651	C–S stretching; guanine; tyrosine	Proteins (sulfur-containing amino acids, tyrosine), nucleic acids (Puliga et al., 2022)
732	Adenine ring breathing	Nucleic acids, eDNA (Puliga et al., 2022)
797	O–P–O stretching; cytosine ring breathing	DNA/RNA, extracellular DNA (Samek et al., 2014)
841	Tryptophan indole ring vibrations; possible oxidative/polysaccharide contributions	Aromatic amino acids (proteins), oxidative species, polysaccharide matrix (Chen et al., 2019)
955	Chitin and glucan vibrations; C=C deformation; C–N stretching	Polysaccharides (chitin, β -glucan), cell wall/EPS matrix (Berus et al., 2022; Hu et al., 2021)
1029	C–H in-plane stretch of phenylalanine; C–C stretching; C–N stretching	Proteins (Phe), phospholipids, carbohydrates (e.g., chitin) (Samek et al., 2014; Hrubanová et al., 2018; Hu et al., 2021)
1082	C–N stretching; O–P–O (DNA); C–C/C–O–C stretching	Proteins, DNA/eDNA, carbohydrates (β -1,3-glucan) (Samek et al., 2014; Hu et al., 2021)
1125	C–N stretching; C–O–C vibration; galactomannan	Proteins, lipids, polysaccharides (galactomannan) (Hrubanová et al., 2018; Hu et al., 2021)
1246	Amide III	Proteins, peptide structures (Kusić et al., 2015)
1328	Amide III; adenine/guanine vibrations; C–H deformation, CH ₂ wagging	Proteins, nucleic acids (Hu et al., 2021); polysaccharide/EPS components (Xiang et al., 2025)
1393	COO ⁻ symmetric stretching	Carboxylate groups, amino acids, organic acids (Ivleva et al., 2008)
1458	CH ₂ scissoring deformation	Lipids, membrane components (Samek et al., 2014; Hrubanová et al., 2018)
1576	Guanine and adenine ring vibrations; COO ⁻ asymmetric stretching; cytochrome c vibrations	Nucleic acids, proteins, cytochrome/protein complexes (Kusić et al., 2015; Ivleva et al., 2008; Ay et al., 2026)
1590	Amide I; vCOO ⁻ asymmetric stretching; C–N stretching/N–H deformation (amide II); aromatic C–C vibrations	Proteins, peptide backbone (Keleştemur and Çulha, 2017; Potocki et al., 2019); proteins, peptide structures, aromatic amino acids, and carboxylate-containing biofilm matrix components (Tiwari et al., 2025)
1695	Amide I	Proteins, peptide backbone (Potocki et al., 2019)

According to the data obtained, the most striking feature in the 8-hour SERS spectrum is the significantly strong 1590 cm⁻¹ band. This band can be associated with aromatic amino acids, protein structures, and amide II vibrations (Keleştemur and Çulha, 2017; Potocki et al., 2019; Tiwari et al., 2025). This supports the idea that cell surface proteins are active, adhesion mechanisms are dominant, and the biofilm is still predominantly cellular activity rather than matrix-based. The 1695 cm⁻¹ band region is generally attributed to C=O stretching, amide I, and secondary protein structural changes (Potocki et al., 2019). In our study, the prominence of this band at 8 hours suggests high metabolic activity, active protein synthesis, and the beginning of biofilm organization. The 1328 cm⁻¹ band region is generally attributed to nucleic acids, proteins, and polysaccharide/EPS components (Hu et al. 2021; Xiang et al., 2025). In our study, the significant increase in this peak at 48 hours suggests that EPS has

matured, biofilm thickness has increased, and matrix development has occurred. The 1393–1458 cm^{-1} region shows weak intensity at 8 hours but strengthens at 48 hours. This supports the idea that the biofilm and matrix structure are still limited at 8 hours, while at 48 hours, it exhibits mature biofilm, high polysaccharide and matrix production, and dense biomass characteristics.

The 24-hour SERS spectrum is thought to represent a transitional phase of the *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm. This phase appears to be a reorganization process between the 8-hour early adhesion phase and the 48-hour mature biofilm phase, as both early-phase protein and metabolic characteristics and mature biofilm EPS or polysaccharide signals are observed in the spectrum. At 24 hours, the 732 cm^{-1} band is prominent and strong. This band is associated with adenine, nucleic acids, and metabolic activity in the literature, and its increase at 24 hours compared to 8 hours supports the idea that cell proliferation is accelerated, biofilm density is increased, and metabolic activity is continued (Puliga et al., 2022). However, its lower value compared to 48 hours suggests that the biofilm is not yet fully mature. The 955 and 1029 cm^{-1} bands are thought to represent the combined contribution of mostly protein/amino acid and polysaccharide components. The emergence of these bands within 24 hours supports the conclusion that EPS production has begun, intercellular matrix formation has increased, and the biofilm architecture is starting to organize. In particular, the 1029 cm^{-1} band has been associated with phenylalanine in the literature, so it should be considered that the structure is still metabolically active at this stage (Berus et al., 2022; Hu et al., 2021; Samek et al., 2004; Hrubanova et al., 2018). The strengthening of the 1246 cm^{-1} band at 24 hours, which is generally associated with Amide III and protein structures in the literature, seems consistent with the synthesis of matrix proteins and the structural stabilization of the biofilm (Kusić et al., 2015). The increase in the 1328 cm^{-1} band is associated in the literature with Amide III; adenine/guanine vibrations; C–H deformation, CH₂ wagging, proteins, nucleic acids, and polysaccharide-EPS components (Hu et al. 2021; Xiang et al., 2025). This band appears to decrease at 24 hours compared to 8 hours, but is much more dominant at 48 hours. This time-dependent change observed at 1328 cm^{-1} may reflect the dynamic biochemical changes occurring during biofilm development. Although this band has been associated with Amide III vibrations, nucleic acid components, and CH₂ deformation/release modes of polysaccharides, its decreased intensity at 24 hours may indicate a transitional phase between early protein-dominant adhesion and a mature EPS-rich biofilm architecture.

The significant increase at 48 hours suggests substantial extracellular matrix accumulation and polysaccharide enrichment during biofilm maturation. The 1393 cm^{-1} and 1458 cm^{-1} bands are attributed to COO[−] symmetric stretching, carboxylate groups, amino acids, organic acids, CH₂ scissoring deformation, lipids, and membrane components (Ivleva et al., 2008; Samek et al., 2014; Hrubanova et al., 2018). The moderate increase in these bands at 24 hours suggests continued cell proliferation, the beginning of membrane reorganization, the transition to a biofilm phenotype, early EPS synthesis, but also that the biofilm is not yet fully mature. The relative decrease in the 1576–1695 cm^{-1} region, which is predominantly protein and amide-related and was dominant at 8 hours, at 24 hours may be a significant finding (Kusić et al., 2015; Ivleva et al., 2008; Ay et al., 2026; Potocki et al., 2019). This supports the initiation of a transition from early adhesion proteins to an EPS-dominant biofilm structure.

The 48-hour SERS spectrum suggests a mature and EPS-enriched structure of the *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm. The increase in peak intensities, particularly compared to 24 hours, indicates biochemical reorganization within the biofilm matrix. The peak reaching its highest intensity at 732 cm^{-1} at 48 hours may be related to nucleic acids, adenine derivatives, and cellular metabolic activity (Puliga et al., 2022). This suggests an increase in biofilm cell density over 48 hours. Significant increases in the 955 and 1029 cm^{-1} regions may be associated with polysaccharide and carbohydrate components (Berus et al., 2022; Hu et al., 2021; Samek et al., 2004; Hrubanova et al., 2018). This particularly supports the strengthening of the EPS (extracellular polymeric substance) matrix in the mature biofilm. Enhanced Raman bands at 955 and 1029 cm^{-1} in the 48-hour biofilm spectrum demonstrate significant biochemical maturation in *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm (Berus et al., 2022; Hu et al., 2021; Samek et al., 2004; Hrubanova et al., 2018).

The 955 cm^{-1} band may be associated with polysaccharide-related C–C vibrations and extracellular matrix accumulation, while the concentrated 1029 cm^{-1} peak, attributed to phenylalanine-related C–H in-plane stretching as well as C–C and C–N stretching vibrations, indicates increased protein and aromatic amino acid contributions in the mature biofilm matrix. Increased intensities of the 1246 and

1328 cm^{-1} bands in the 48-hour spectrum indicate significant biochemical maturation in the *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm (Kusić et al., 2015; Hu et al. 2021; Xiang et al., 2025). The 1246 cm^{-1} band, attributed to amide III vibrations, suggests increased protein and peptide-related components in the biofilm matrix (Kusić et al., 2015). Meanwhile, the prominent 1328 cm^{-1} peak associated with Amide III, adenine/guanine oscillations, C–H deformation, and CH_2 oscillation modes reflects the combined contribution of proteins, nucleic acids, and EPS-associated polysaccharide structures (Hu et al. 2021; Xiang et al., 2025). These findings support the development of a dense and structurally complex mature biofilm architecture within 48 hours. Enhanced Raman bands at 1393 and 1458 cm^{-1} in the 48-hour biofilm spectrum demonstrate significant biochemical and structural maturation in the *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm (Ivleva et al., 2008; Samek et al., 2014; Hrubanova et al., 2018).

The 1393 cm^{-1} band, attributed to COO^- symmetric stretching vibrations, suggests increased contributions from carboxylate-containing biomolecules, amino acids, and organic acids within the extracellular matrix. In parallel, the concentrated 1458 cm^{-1} band, associated with CH_2 shear deformation, reflects increased lipid and membrane-related components, consistent with increased cellular biomass and membrane organization in the mature biofilm structure. The 1590 cm^{-1} band, while quite prominent in the early stages of biofilm formation, its relative decrease at 48 hours suggests biochemical remodeling during biofilm maturation. Since this band is associated with Amid I, asymmetric COO^- stretching, vibrations related to Amid II, and aromatic C–C modes, its decreased intensity may reflect structural rearrangement of proteinaceous and aromatic biomolecules within the mature extracellular matrix. This spectral transition indicates a shift from early metabolically active adhesion processes to a more stable and structurally organized mature biofilm architecture. The maintenance of the signal around 1695 cm^{-1} for 48 hours is associated with amide I and protein structures, supporting the presence of biofilm matrix proteins (Potocki et al., 2019).

Overall, SERS findings reveal that *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm development is characterized by early protein and adhesion mechanisms, reorganization and early EPS production within 24 hours, and reaching a mature biofilm architecture with dense polysaccharide and matrix accumulation within 48 hours. The SERS spectral changes obtained in our study are generally consistent with literature findings reporting time-dependent biochemical reorganization of fungal biofilm development. In particular, the dominance of protein/amide-related bands in the early stages and the strengthening of polysaccharide/EPS-related bands in later hours are reported as a key feature of biofilm maturation (Stenclova et al., 2019).

A review of previous Raman/SERS-based studies on *Candida* biofilms in the literature reveals that analyses were predominantly performed at a single time point and generally relied on strain differentiation. Some studies also focus on the antifungal response to various agents. This study, however, aims to understand the time-dependent biochemical changes in the biofilm matrix during maturation. On the other hand, our findings support the idea that SERS analysis can distinguish different phases of *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm development and reveal the biochemical reorganization occurring during biofilm maturation with high sensitivity. In particular, the spectral tracking of the transition from the protein-dominant early adhesion phase to the polysaccharide/EPS-rich mature biofilm structure demonstrates that the SERS approach can be a powerful analytical tool in understanding fungal biofilm dynamics.

4. Conclusion and Recommendations

This study aimed to elucidate the time-dependent biochemical changes in *C. parapsilosis* ATCC 22019 biofilm development using SERS. Thus, by comparing 8, 24, and 48-hour biofilm phases, the transition from the early adhesion phase to an EPS-rich mature biofilm structure was spectrally monitored. Although protein and amide-related bands were dominant in the early phase, the strengthening of polysaccharide and EPS-related bands over time clearly demonstrates the dynamic nature of biofilm maturation. One of the noteworthy aspects of the study is the identification of the time-dependent change in the 1328 cm^{-1} band as a potential spectral indicator of biofilm reorganization. Furthermore, the relative decrease in the 1590 cm^{-1} band reflects the transition from protein-dominant adhesion processes to a matrix-dominant mature biofilm architecture, supporting the functional reorganization of biofilm development. SERS can be used not only for the identification of microorganisms but also as a powerful analytical approach for monitoring fungal biofilm maturation

and distinguishing biofilm stages. However, this study examined biofilm development at three different time points, and it is important to reveal changes at more frequent time intervals in future studies.

On the other hand, although SERS spectra offer strong information about biochemical reorganization, some spectral bands may contain overlapping contributions from different biomolecules. Therefore, future studies supported by multifaceted analyses using confocal microscopy, scanning electron microscopy, FTIR, or omics-based approaches could contribute to a more comprehensive evaluation of biofilm structure. Another limitation of the study is that only a single *C. parapsilosis* strain was evaluated. Since there can be significant differences in biofilm production and matrix composition among clinical isolates, comparing different clinical strains could strengthen the clinical applicability of SERS-based biofilm analyses. In addition, investigating the effect of antifungal agents on biofilm development through temporal SERS analysis could contribute to understanding biofilm-related antifungal resistance mechanisms. Future studies could focus on combining SERS data with artificial intelligence and machine learning-based analysis methods. This would enable automated classification of biofilm development stages, rapid detection of biofilm maturation, and real-time monitoring of antifungal treatment responses. In addition, the development of portable SERS platforms that can be directly applied in clinical samples may offer new opportunities for the rapid and sensitive diagnosis of fungal biofilm infections.

Thanks and Information Note

This work was supported by Eskişehir Osmangazi University Scientific Research Projects Coordination Unit under grant number FDK-2025-3456.

References

- Ay, K. O., Gürsu, B. Y., Öztürk, B. Y., & Dağ, İ. (2026). Evaluation of Pesticide Acetamiprid on *Candida parapsilosis* Biofilm Using Raman Spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 103893.
- Berus, S. M., Adamczyk-Popławska, M., Goździk, K., Przedpeńska, G., Szymborski, T. R., Stepanenko, Y., & Kamińska, A. (2022). SERS-PLSR analysis of vaginal microflora: towards the spectral library of microorganisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 12576.
- Chen, X., Tang, M., Liu, Y., Huang, J., Liu, Z., Tian, H., ... & Fu, W. (2019). Surface-enhanced Raman scattering method for the identification of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* using positively charged silver nanoparticles. *Microchimica Acta*, 186(2), 102.
- Fleischmann, M., Hendra, P. J., & McQuillan, A. J. (1974). Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode. *Chemical physics letters*, 26(2), 163-166.
- Hrubanova, K., Krzyzanek, V., Nebesarova, J., Ruzicka, F., Pilat, Z., & Samek, O. (2018). Monitoring *Candida parapsilosis* and *Staphylococcus epidermidis* Biofilms by a Combination of Scanning Electron Microscopy and Raman Spectroscopy. *Sensors*, 18(12), 4089.
- Hu, S., Kang, H., Gu, F., Wang, C., Cheng, S., Gong, W., ... & Yang, Y. (2021). Rapid detection method for pathogenic *Candida* captured by magnetic nanoparticles and identified using SERS via AgNPs+. *International Journal of Nanomedicine*, 941-950.
- Ivleva, N. P., Wagner, M., Horn, H., Niessner, R., & Haisch, C. (2008). In situ surface-enhanced Raman scattering analysis of biofilm. *Analytical chemistry*, 80(22), 8538-8544.
- Keleştemur, S., & Çulha, M. (2017). Understanding and discrimination of biofilms of clinically relevant microorganisms using surface-enhanced Raman scattering. *Applied spectroscopy*, 71(6), 1180-1188.
- Kusić, D., Kampe, B., Ramoji, A., Neugebauer, U., Rösch, P., & Popp, J. (2015). Raman spectroscopic differentiation of planktonic bacteria and biofilms. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 407(22), 6803.
- Lee, P.C.; Meisel, D. Adsorption and Surface-Enhanced Raman of Dyes on Silver and Gold Sols. *Journal of Physical Chemistry*, 1982, 86, 3391–3395.
- Malinová, Z., Čonková, E., & Váczi, P. (2023). Biofilm formation in medically important *Candida* species. *Journal of Fungi*, 9(10), 955.
- Mandal, S. M., Mahata, D., Migliolo, L., Parekh, A., Addy, P. S., Mandal, M., & Basak, A. (2014). Glucose directly promotes antifungal resistance in the fungal pathogen, *Candida* spp. *Journal of Biological Chemistry*, 289(37), 25469-25473.

- Pezzotti, G., Adachi, T., Imamura, H., Ikegami, S., Kitahara, R., Yamamoto, T., ... & Makimura, K. (2024). Raman spectroscopic algorithms for assessing virulence in oral candidiasis: The fight-or-flight response. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21), 11410.
- Potocki, L., Depciuch, J., Kuna, E., Worek, M., Lewinska, A., & Wnuk, M. (2019). FTIR and Raman Spectroscopy-Based Biochemical Profiling Reflects Genomic Diversity of Clinical *Candida* Isolates That May Be Useful for Diagnosis and Targeted Therapy of Candidiasis. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(4), 988. <https://doi.org/10.3390/ijms20040988>
- Puliga, F., Zuffi, V., Zambonelli, A., Francioso, O., & Sanchez-Cortes, S. (2022). Spectroscopic analysis of mushrooms by surface-enhanced Raman scattering (SERS). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 100.
- Samek, O., Mlynariková, K., Bernatová, S., Ježek, J., Krzyžánek, V., Šiler, M., Zemánek, P., Růžicka, F., Holá, V., & Mahelová, M. (2014). *Candida parapsilosis* Biofilm Identification by Raman Spectroscopy. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(12), 23924-23935.
- Stenclova, P., Freisinger, S., Barth, H., Kromka, A., & Mizaikoff, B. (2019). Cyclic changes in the amide bands within *Escherichia coli* biofilms monitored using real-time infrared attenuated total reflection spectroscopy (IR-ATR). *Applied Spectroscopy*, 73(4), 424-432.
- Tiwari, A. K., Nikhil, A., Chaurasia, A., Pandey, P. C., Narayan, R. J., & Gupta, M. K. (2025). Making vancomycin a potent broad-spectrum antimicrobial agent using polyaziridine-stabilized gold nanoparticles as a delivery vehicle. *Journal of Biomaterials Applications*, 40(1), 145-162.
- Trofa, D., Gácsér, A., & Nosanchuk, J. D. (2008). *Candida parapsilosis*, an emerging fungal pathogen. *Clinical microbiology reviews*, 21(4), 606-625.
- Xiang, Y., Wu, J., Li, F., Sun, S., Liu, X., & Guo, J. (2025). Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) substrates based on biosynthesized silver nanoparticles for identification of various *Candida* species. *Alexandria Engineering Journal*, 123, 242-248.

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MECHANICAL MILLING TIME ON THE
POWDER PARTICLE MORPHOLOGY OF AA7075 ALUMINUM ALLOY**

Asst. Prof. Badegül Tunçay

Department of Aeronautical Engineering, Sivas University of Science and Technology, Sivas, Türkiye

Email: btuncay@sivas.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4012-8343>

Abstract

In this study, the AA7075 alloy was mechanically milled (MM) for different milling times, and the effect of milling time on the AA7075 powder particles was investigated. The mechanical milling times were selected as 30, 60, 90, and 150 min. The dimensional and morphological characteristics of the MM 'ed AA7075 powder particles were characterized using scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the initial average particle size of the AA7075 powder was 207.28 μm , which decreased to 138.32 μm after 60 min of mechanical milling. However, after 150 min of mechanical milling, the average particle size increased to 229.53 μm . This increase was attributed to the transition from the fracture-dominated mechanism to the cold-welding mechanism during prolonged mechanical milling, resulting from repeated plastic deformation.

Keywords: AA7075 alloy, powder metallurgy, particle size.

1. Introduction

AA7075 alloys are widely used in various industrial fields, including the automotive, aerospace, space, and defense industries, owing to their high strength-to-weight ratio and excellent heat-treatability (Soares et al., 2021; Starke & Staley, 1996). Among aluminum (Al) alloys, AA7075 is one of the most widely used high-strength materials in the aerospace industry, particularly for aircraft fuselage and wing structures (Bouzekova-Penkova & Miteva, 2022; Soares et al., 2021). To further enhance the performance of AA7075 alloys, various alloying elements have been incorporated. In particular, the addition of elemental powders such as Cu, Mg, and Zn has been reported to improve not only the mechanical strength but also the damage tolerance of the alloy (Polmear et al., 2017; Taleghani et al., 2016).

AA7075 alloys have been manufactured using various processing routes, including casting, forging, extrusion, and semi-solid processing. Recently, powder metallurgy (PM) has attracted considerable attention because it enables effective control of powder morphology and microstructure while allowing the production of near-net-shape components (Yildirim & Özyürek, 2018). Mechanical alloying (MA) is an effective powder metallurgy technique that minimizes the segregation and agglomeration tendency of reinforcement phases, thereby promoting the homogeneous distribution of nanoparticles within aluminum and other metallic matrices (Suryanarayana, 2001b). This process enables the fabrication of nanocrystalline alloys and nanocomposites through repeated plastic deformation, cold welding, and fracture mechanisms occurring during high-energy ball milling (Canakci & Varol, 2014). Composite materials with high hardness and strength, which are difficult and costly to fabricate using conventional casting and machining methods, can be successfully produced by high-energy ball milling (Li et al., 2019).

However, the microstructural and mechanical properties of mechanically alloyed materials strongly depend on processing parameters such as the manufacturing route, milling time, ball-to-powder ratio, milling speed, and process control agent (Varol & Canakci, 2013). Among these parameters, milling time is one of the most critical factors because it directly influences the morphology and homogeneity of powder particles, thereby playing a decisive role in determining the microstructural characteristics and overall performance of the final product (Suryanarayana, 2001b).

Previous studies have reported that increasing the mechanical alloying time subjects powder particles to repeated plastic deformation, cold welding, and fracture mechanisms, leading to significant changes in particle morphology, particle size, and homogeneity (Cury Suryanarayana, 2004). In particular milling time is considered one of the key processing parameters governing the morphological evolution of powder particles and, consequently, has a decisive influence on the microstructural and mechanical properties of the final product (Taleghani et al., 2016).

In the present study, AA7075 aluminum alloy powders were subjected to high-energy ball milling for different mechanical alloying times (30, 60, 90, and 150 min) to investigate the evolution of particle size and morphological characteristics. The effect of milling time on the particle size and morphology of AA7075 alloy powders was systematically evaluated to determine the optimum milling time. The findings of this study are expected to contribute to the optimization of powder processing conditions for high-performance aluminum alloys produced by powder metallurgy and to support the development of advanced engineering applications.

2. Materials and Methods

The chemical composition of the AA7075 alloy used in this study is presented in Table 1. MM was performed using a planetary ball mill (FRITSCH GmbH) at 400 rpm. During the milling process, methanol (1 wt.%) was employed as the process control agent (PCA). Stainless steel balls with a diameter of 6 mm were used as the grinding media, with a ball-to-powder weight ratio (BPR) of 10:1. The AA7075 alloy powders were MM'ed for 30, 60, 90, and 150 min.

Table 1. Chemical composition (wt. %) of the AA7075 alloy used in this study.

Materials	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr	Mn	Cr	Al
AA7075 powder	5,48	2,596	1,568	0,549	0,403	0,03	0,014	0,0125	Remain

The morphology of the MM'ed AA7075 alloy powder particles was characterized using a field-emission scanning electron microscope (FE-SEM, Carl Zeiss Ultra Plus Gemini) after the milling process. The average particle size of the AA7075 alloy powders was determined from the SEM images using ImageJ image analysis software.

3. Findings and Discussion

Microstructural Analysis

Figure 1 presents the SEM images of AA7075 alloy powders mechanically milled for different milling times. The unmilled powder (Fig. 1.a) exhibits an irregular morphology with relatively coarse particles. After 30 min of MM the AA7075 powder particles show the onset of morphological deformation accompanied by fracture at the sharp particle edges (Fig. 1.b). SEM images of the powders milled for 60 and 90 min reveal the formation of flatter particles, while the brighter contrast observed on the particle surfaces indicates an increased degree of plastic deformation. In addition, after 60 min of milling, repeated plastic deformation promotes fracture at the particle edges, resulting in a reduction in the average particle size. In contrast, after 150 min of MM the particle size increases because the fine particles generated by repeated fracture adhere to the surfaces of larger particles through the cold-welding mechanism, leading to particle coarsening.

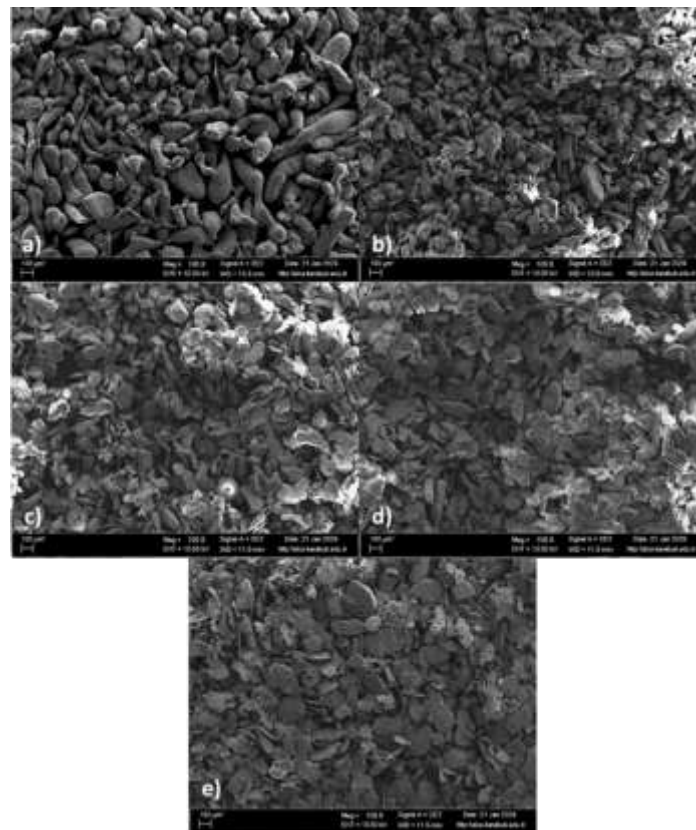


Figure 1. SEM images of AA7075 alloy powders MM'ed for different milling times: (a) 0 min, (b) 30 min, (c) 60 min, (d) 90 min, and (e) 150 min.

Table 2 presents the average particle size values obtained by analyzing the SEM images shown in Figure 1 using the ImageJ image analysis software. With the onset of MM repeated ball–particle–ball and ball–particle–vial wall collisions induced severe plastic deformation and particle fracture, resulting in a reduction in the average particle size from 207.28 μm (0 min) to 183.79 μm (30 min) and subsequently to 138.32 μm (60 min). As the milling time was further increased, the average particle size increased to 141.03 μm after 90 min and to 229.53 μm after 150 min due to the adhesion of fine fractured particles onto the surfaces of larger particles through the cold-welding mechanism. These results indicate that the fracture mechanism dominates during the initial stages of mechanical milling, whereas prolonged milling promotes cold welding, leading to particle coarsening.

Table 2. Average particle sizes of unmilled and MM'ed AA7075 alloy powders at different milling times.

Milling Time	Average Particle Size (μm)
0 min	207.28
30 min	183.79
60 min	138.32
90 min	141.03
150 min	229.53

The SEM images obtained after 30 and 60 min of MM (Figs. 1b and 1c) reveal that the powder particles exhibit a finer, flake-like morphology with a more homogeneous distribution. Previous studies on the MM of AA7075 alloys have reported that significant reductions in particle size occur during the initial stages of milling owing to severe plastic deformation and fracture mechanisms (Soares et al., 2021; Suryanarayana, 2001a). This behavior is attributed to the high-energy impacts between the milling media and powder particles, which promote strain hardening and facilitate particle fracture (Cury Suryanarayana, 2004). The lowest average particle size was obtained after 60 min of MM. Considering the initial characteristics of the AA7075 powder and the applied milling conditions, 60 min was identified as the optimum milling time. The average particle size decreased to 138.32 μm after 60 min of milling, corresponding to approximately 66% of the initial particle size.

With further increases in milling time, the influence of the fracture mechanism gradually diminished, while the cold-welding mechanism became dominant, resulting in an increase in particle size. When the milling time was extended to 90 min (Fig. 1d), the average particle size increased slightly to 141.03 μm . At this stage, fracture and cold-welding mechanisms are considered to occur simultaneously. Since the newly generated particle surfaces possess high surface energy during mechanical milling, the ductile aluminum alloy particles exhibit a strong tendency to adhere to one another. Consequently, particle clustering and agglomeration begin to develop in some regions (Benjamin & Volin, 1974).

After the longest MM time (150 min), the average particle size increased to 229.53 μm . The large, flattened particles observed in Fig. 1.e indicate that the cold-welding mechanism became dominant during prolonged milling. This phenomenon, which is commonly observed in ductile aluminum alloys, can be explained by the continuous plastic deformation of the particles, causing them to weld together and form larger agglomerates (Koch, 1993; Suryanarayana, 2001a). Similar increases in particle size after prolonged milling have also been reported for AA7075 and other aluminum alloys, where the particle coarsening was attributed to the predominance of the cold-welding mechanism (Koch, 1993).

The 60 min milling duration was identified as the optimum condition for achieving the lowest average particle size. At longer milling durations, the average particle size increased as the contribution of the fracture mechanism diminished, and the cold-welding mechanism became predominant.

4. Conclusion and Recommendations

Based on the SEM observations and particle size analysis of AA7075 alloy powders MM'ed for different times, the following conclusions can be drawn:

- Mechanical milling time had a significant influence on the morphology and particle size of the AA7075 alloy powders.
- During the initial stage of mechanical milling (30–60 min), the fracture mechanism was dominant, resulting in a reduction in the average particle size. The minimum average particle size of 138.32 μm was obtained after 60 min of milling.
- Increasing the milling time to 90 and 150 min enhanced the cold-welding effect, leading to a subsequent increase in the average particle size.
- After the longest milling time (150 min), large, flattened particles were observed, and the average particle size increased to 229.53 μm .
- Under the processing conditions employed in this study, 60 min was identified as the optimum mechanical milling time, producing the smallest average particle size and a more homogeneous particle morphology for AA7075 alloy powders.

References

- Benjamin, J. S., & Volin, T. E. (1974). The mechanism of mechanical alloying. *Metallurgical Transactions*, 5(8), 1929–1934.
- Bouzekova-Penkova, A., & Miteva, A. (2022). Some Aerospace Applications of 7075 (B95) Aluminium Alloy. *Aerospace Research in Bulgaria*, 34, 165–179. <https://doi.org/10.3897/arb.v34.e15>
- Canakci, A., & Varol, T. (2014). *Microstructure and properties of AA7075 / Al – SiC composites fabricated using powder metallurgy and hot pressing*. 268, 72–79.
- Cury Suryanarayana. (2004). *Mechanical Alloying and Milling* (First Edit). CRC Press / Taylor & Francis.
- Koch, C. C. (1993). The synthesis and structure of nanocrystalline materials produced by mechanical attrition: A review. *Nanostructured Materials*, 2(2), 109–129. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0965-9773\(93\)90016-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0965-9773(93)90016-5)
- Li, X., Wen, X., Zhao, H., Ma, Z., Yu, L., Li, C., Liu, C., Guo, Q., & Liu, Y. (2019). *The formation and evolution mechanism of amorphous layer surrounding Nb nano-grains in Nb-Al system during mechanical alloying process*. 779, 175–182.
- Polmear, I., StJohn, D., Nie, J. F., & Qian, M. (2017). Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals. In *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals: Fifth Edition*.
- Soares, E., Alves, E., Alves, K., Ara, O., Mesguich, D., Chevallier, G., Laurent, C., & Estourn, C. (2021). *Microstructure and Mechanical Properties of AA7075 Aluminum Alloy Fabricated by Spark Plasma Sintering (SPS)*. 1–11.
- Starke, E. A., & Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2), 131–172. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0376-0421\(95\)00004-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0376-0421(95)00004-6)
- Suryanarayana, C. (2001a). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46(1–2), 1–184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
- Suryanarayana, C. (2001b). *Mechanical Alloying and Milling* (F. Robert W. Cahn, Ed.). Marcel Dekker.
- Taleghani, M. A. J., Navas, E. M. R., Salehi, M., Torralba, J. M., Taleghani, M. A. J., Navas, E. M. R., Salehi, M., & Torralba, J. M. (2016). *Optimisation of mechanical milling process for production of AA 7075 /(SiC or TiB 2) composite powders* *Optimisation of mechanical milling process for production of AA 7075 /(SiC or TiB 2) composite powders*. 5899(March). <https://doi.org/10.1179/1743290112Y.0000000021>
- Varol, T., & Canakci, A. (2013). *Effect of particle size and ratio of B 4 C reinforcement on properties and morphology of nanocrystalline Al2024-B 4 C composite powders*. 246, 462–472.
- Yildirim, M., & Özyürek, D. (2018). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen 7075 Al Alaşımlarında Mn Miktarının Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi*. 6(2), 269–276. <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.336025>

RECENT ADVANCES IN ANIMAL FEED PROCESSING TECHNIQUES AND EQUIPMENT

Prof. Dr. Songül GÜRSOY

Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machinery and Technology
Engineering, Diyarbakır-Türkiye

Email: songul.gursoy@dicle.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6145-0684>

Ass. Prof. Dr. Dilek ŞENTÜRK DEMİREL

Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Animal Science, Diyarbakır-Türkiye

Email: senturk@dicle.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4142-2632>

Abstract

Animal feed does not always provide optimal benefits when consumed directly. Therefore, feeds need to undergo various processes to make them more digestible, storable, and transportable. Today, various animal feed processing techniques and equipment have been developed to improve the physical, chemical, and biological properties of animal feeds and increase their digestibility. Animal feed processing techniques encompass the processes of grinding, mixing, pelleting, and conditioning raw materials. Pellet feed machines, hammer mills, feed mixers, and conditioners are among the most basic equipment used for this purpose. In this study, animal feed processing techniques and the equipment used in animal feed processes are examined in detail, and relevant studies on the subject are reviewed. In addition, recent technological developments in this field have been examined.

Keywords: Animal feed, Feed processing techniques, Pelletizing, Machinery

1. Introduction

Livestock farming plays a very important role in agricultural production, both in meeting food requirements and in terms of economic and rural development. Due to the rapid increase in the world's population, the demand for animal products such as meat, milk, and eggs is expected to increase significantly. However, meeting this increasing demand brings with it some significant problems. These problems include fluctuating raw material prices, climate change, limited natural resources, feed safety concerns, nutrient losses during processing, technological limitations, and environmental impacts (Ruiz, et al., 2020).

Feed is the largest operating expense in livestock production and directly influences animal growth, productivity, reproduction, immune function, and product quality. Selecting appropriate feed ingredients is only one aspect of successful nutrition; equally important is the processing of these ingredients to improve their nutritional value and physical characteristics (Makkar & Beever, 2013). Modern feed processing technologies are designed to enhance feed quality, reduce nutrient losses, increase digestibility, improve feed hygiene, and facilitate handling and storage (Makkar, 2016).

Animal feeds are generally classified according to sources, nutrient density, feed legislation. The major categories include roughages, concentrates, supplements, and complete feeds. Raw feed ingredients are rarely ideal for direct feeding because they often have poor physical characteristics, inconsistent nutrient availability, microbial contamination, and anti-nutritional compounds. Feed processing modifies these properties and improves overall feed quality (Matsushima, 1979).

Feed production and processing are among the most critical components of sustainable livestock systems, directly influencing animal health, productivity, product quality, and environmental sustainability because high-quality animal feed not only supports optimal animal growth and productivity but also improves feed conversion efficiency, animal welfare, and product quality while reducing environmental impacts. To ensure sustainable and economically profitable livestock production, farmers need to prioritize the use of high-quality feed, regularly assess the nutritional requirements of their animals, and adopt feed management practices that meet the specific needs of each animal species (Baris, 2023).

Feed processing enhances digestibility, improves feed hygiene, reduces waste, increases nutrient availability, extends shelf life, and promotes better animal performance. Techniques such as grinding, mixing, pelleting, extrusion, and steam conditioning have become integral components of modern feed manufacturing. In this purpose, the different types of machinery needed for the production of various types of feeds is designed and manufactured. These machines include cleaner, grinders, mixers, elevators and conveyors, mixer, extruders, cooker, driers, fat sprayers and steam boilers.

Feed processing is not just about producing feed; it's an integrated process encompassing production line design, technologies used, quality control, storage, and transportation. Furthermore, many different pieces of equipment and processes can be used in feed factories and production stages. The goal in feed processing is to combine raw materials with different properties using appropriate technologies and produce a balanced feed that fully meets the nutritional needs of animals during specific production periods. Therefore, feed production is an interdisciplinary process requiring both the right formulation and the right production technology.

This review provides a comprehensive overview of the techniques and machinery used in feed processing, while also examining recent technological advancements in the field.

2. Main Feed Processing Techniques and Machines

Feed raw materials can be ground into flour, processed into granules or pellets, and made available for use, depending on the nutritional requirements of the animals and the purpose of production. Factors such as preserving nutritional value, ease of consumption, and feed utilization rate are considered when determining the feed form. Furthermore, the homogeneous distribution of antibiotics, amino acids, vitamins, minerals, and other additives throughout the feed mixture is of great importance. A homogeneous mixture ensures that each feed granule has a similar nutritional content, supporting balanced animal nutrition, improving performance, and guaranteeing the effectiveness of additives (Schoeff et al., 2005).

Various processing techniques such as grinding, mixing, conditioning, pelleting, extrusion, crumbling, flaking, drying, cooling, and coating are widely employed in feed manufacturing. Feed production consists of many steps, from the acceptance of raw materials to their pelleting and packaging.

Different machines are involved in each step. The main machines in feed processing line is presented in Figure 1(Double Crane Machinery, 2021; Richi Machinery, 2026).

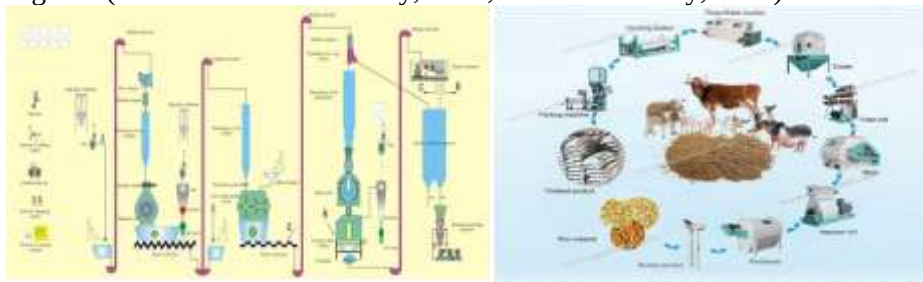


Figure 1. Feed processing line (Double Crane Machinery, 2021; Richi Machinery, 2026)

Feed cleaning is one of the most important preliminary operations in the feed manufacturing industry. The quality and safety of animal feed depend not only on ingredient formulation but also on the removal of contaminants before further processing. Foreign materials such as stones, metal fragments, dust, chaff, weed seeds, and oversized particles can reduce product quality, damage processing equipment, increase maintenance costs, and pose risks to animal health. Feed cleaning machines employ various physical separation principles including screening, aspiration, magnetic separation, gravity separation, and destoning—to eliminate unwanted materials from raw feed ingredients (Richi Machinery, 2026).

Feed grinding, which reduce the particle size of feed ingredients to improve mixing uniformity, facilitate pellet production, and enhance animal performance, is a critical operation in feed manufacturing. It directly influences feed quality, nutrient digestibility, pellet durability, and production efficiency. Various grinding machines (hammer mill, roller mill, disc mills, vertical grinding mills etc.) have been developed to process different feed materials with varying physical properties. The selection of an appropriate grinding system depends on feed composition, required particle size, energy consumption, and production capacity (Camalan & Önal, 2016).

Feed Mixing is the process of blending different feed ingredients into a uniform and homogeneous mixture so that every portion of the feed contains the same amount of nutrients and additives. It is one of the most critical steps in feed manufacturing because it ensures that animals receive a balanced diet with every meal. There are various types of feed mixing machines (Vertical, horizontal, double cone rotary feed mixer etc.) on the market (Balami et al., 2013). A mixing machine should produce a uniform feed in a minimum time with a minimum cost of overhead, power and labor (Lindley, 1991). Adebukola and Patrick (2019) designed a fish feed mixing machine and evaluated on the performance of the developed mixer. They recommend i) The mixer should be operated at mixing auger speed of 200 rpm for a period of 20 to 25 minutes per batch of mixing, ii) Further research should be carried out to determine the effect of moisture content on the performance of the machine, iii) The use of a conveyor system may be considered for use as this will ease delivery of materials into the mixer.

Among various feed processing methods, pelleting has become the dominant technology of commercial feed production for poultry, swine, cattle, rabbits, pets, and aquatic animals. The pelleting process improves the physical structure of the feed, increasing animal consumption, reducing feed losses, and facilitating storage and transportation. The different types of feed pellet machine (e.g., Flat Die & Ring Die Pellet Mills) was developed, which compress ground and mixed feed raw materials into cylindrical pellets using pressure, friction, and, if necessary, steam. Ring die pellet machines, in particular, are used as the standard in industrial production due to their high capacity, energy efficiency, and pellet quality. Flat die machines, on the other hand, are a suitable option for small-scale businesses thanks to their low investment costs (Yemsa Makine, 2025). The process in a feed pellet machine generally consists of the following stages:

Feeding: The mixed feed mixture is fed into the pellet machine.

Conditioning: The feed is moistened and its temperature increased by adding steam and water. This process causes the starch to gelatinize and improves pellet quality.

Compression: Rotating rollers pass the feed through the holes of the die under high pressure.

Cutting: The pellets coming out of the die are cut to the desired length using blades.

Cooling: The newly produced hot pellets are hardened by reducing their moisture in the cooler.

Sieving and Packaging: Broken pellets are separated and the high-quality pellets are stored or packaged.

When selecting a machine, production capacity, animal type, raw material characteristics, energy consumption, and maintenance costs should be evaluated together. In addition, the correct application of grinding, mixing, and conditioning processes before pelleting are fundamental factors that directly affect the final pellet quality (Thomasa & van der Poel, 2020).

Extrusion machines are among the most advanced technologies used in the feed industry. They process feed ingredients under controlled conditions of high temperature, pressure, moisture, and mechanical shear, producing feeds with improved nutritional value, digestibility, and physical characteristics. Extrusion is widely used in the production of aquaculture feeds, pet foods, specialty livestock feeds, and some poultry and ruminant feeds (Riaz & Rokey, 2011).

A feed drying machine is essential in aquaculture and animal feed production to reduce the moisture of freshly pelleted or extruded feed (often above 22%) to a safe storage level. It prevents mold, spoilage, and pellet degradation. The most common types include continuous multi-layer mesh belt dryers, Rotary Drum Dryers and vertical dryers.

While a pellet mill compresses powder into larger pellets (typically 3 mm - 8 mm), many animals, especially young ones, require smaller sizes. Pellet Crushing Machine (Feed Crumbler) located immediately after the pellet cooling machine and before the final packaging, downsize finished pellets for young livestock such as chicks, ducklings, piglets, and fingerlings that cannot swallow or digest full-sized pellets.

Feed bagging and packing systems automate the final step of feed production by accurately weighing, filling, and sealing animal feed into commercial sacks. These systems protect the feed from moisture and contamination during transport and storage. Depending on your production volume, modern bagging setups are built around specific workflows and levels of automation

3. New Technologies for Animal Feed Processing Machines

The animal feed production industry is constantly evolving, and modern technologies play a crucial role in shaping its future because modern feed processing industry involves a series of interconnected processes including raw material receiving, cleaning, grinding, mixing, conditioning, pelleting or extrusion, cooling, drying, coating, packaging, and storage. Each process requires precise control to ensure consistent nutritional composition and physical quality. Today, various modern technologies have been developed in the animal feed processing industry, focusing on automation, energy efficiency, and performance optimization, allowing factories to enhance their productivity and produce higher-quality animal feed.

Automation and intelligent systems have emerged as key technologies that address these challenges by integrating advanced control systems, sensors, data analytics, artificial intelligence (AI), and Industrial Internet of Things (IoT) technologies into feed processing operations. These technologies enable real-time monitoring, precise process control, predictive maintenance, and optimized resource utilization throughout the feed production chain. For example, Smart Control Systems (Intelligent sensors and software) allow precise control of feed processing machinery, improving production reliability. Real-Time Data Monitoring (Automated systems) can continuously monitor performance metrics like temperature, moisture, and ingredient ratios, optimizing resource usage (Anyang Best Complete Machinery Engineering Co., Ltd., 2026).

Animal feed production is a highly energy-intensive industrial process involving multiple mechanical and thermal operations. The principal stages include raw material receiving, grinding, mixing, conditioning, pelleting or extrusion, cooling, drying, and packaging. Each process consumes electrical or thermal energy, making energy efficiency a critical factor affecting production costs and environmental performance. Recent advances in feed processing equipment have focused on minimizing energy consumption while maintaining or improving feed quality. Energy-efficient machinery incorporates optimized mechanical designs, intelligent control systems, heat recovery technologies, and advanced motors that significantly reduce power requirements (Dubey, 2026). Energy-efficient equipment not only reduces operational costs but also minimizes environmental impact. Modern feed machines use advanced technologies such as variable frequency drives (VFDs) and energy recovery systems.

As feed production volumes continue to increase, manufacturers are under constant pressure to improve efficiency, reduce operating costs, maintain product quality, and comply with strict food safety standards. High-performance feed processing machines have become essential in meeting these challenges by providing greater productivity, precision, automation, and energy efficiency. Modern feed mills integrate advanced machinery throughout every stage of production, from raw material intake to final packaging. These machines not only increase production capacity but also ensure consistent feed quality, minimize waste, and optimize resource utilization (Anyang Best Complete Machinery Engineering Co., Ltd., 2026).

4. Conclusion and Recommendations

Feed processing has become an indispensable component of modern livestock production because it directly influences feed quality, animal performance, production efficiency, and economic sustainability. As discussed in this review, raw feed ingredients rarely possess the physical, chemical, and biological characteristics required for optimal animal nutrition. Therefore, processing techniques such as cleaning, grinding, mixing, conditioning, pelleting, extrusion, drying, cooling, crumbling, and packaging are essential for improving nutrient availability, feed hygiene, storage stability, handling characteristics, and overall feed utilization.

Recent technological developments have significantly transformed the feed manufacturing industry. Automation, artificial intelligence, Industrial Internet of Things (IoT) technologies, intelligent control systems, and energy-efficient equipment enable real-time process monitoring, predictive maintenance, improved production consistency, and reduced operating costs. These innovations contribute not only to increased productivity but also to improved sustainability by minimizing energy consumption, raw material losses, and environmental impacts.

Overall, successful feed production depends on the integration of appropriate processing technologies, modern machinery, effective quality control systems, and continuous technological innovation. Future feed manufacturing will increasingly rely on smart, automated, and energy-efficient production systems capable of producing high-quality feeds while supporting sustainable and profitable livestock production.

References

- Adebukola, A. A. & Patrick, O. A. (2019). Development and evaluation of a fish feed mixer. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21(3), 226–233.
- Anyang Best Complete Machinery Engineering Co., Ltd. (2026). Modern Technologies in Animal Feed Production Machines, Accessed on 25 June 2026, available online at: <https://www.feedmillplant.com/animal-feed-processing-plant/buy-animal-feed-production-machine-technology.html>
- Balami, A. A., Adgidzi, D. & Muázu, A. (2013). Development and testing of an animal feed mixing machine. *International Journal of Basics and Applied Sciences*, 1(3), 491–503.
- Baris, A. (2023). Impact of feed quality on livestock productivity. *Journal of Livestock Policy*, 2(2), 1 - 10
- Camalan, M. & Önal, M.A.R. (2016). Influence of high-pressure grinding rolls on physical properties and impact breakage behavior of coarsely sized cement clinker. *Particulate Science and Technology*, 34(3), 278-288.
- Double Crane Machinery, 2021. Poultry Mash Feed Plant, Accessed on 25 June 2026, available online at: <https://www.shpelletmill.com/product/poultry-mash-feed-plant/>
- Dubey, V. (2026). Global Feed Processing Machinery Market Report Overview, Accessed on 25 June 2026, available online at: <https://www.congruencemarketinsights.com/report/feed-processing-machinery-market>
- Lindley, L. A. (1991). Mixing processes for agricultural and food materials: 1. Fundamental of mixing. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 48,153–170.
- Makkar, H. P. S. (2016). Animal Nutrition: Beyond the Boundaries of Feed and Feeding, Accessed on 25 June 2026, available online at: <https://www.feedipedia.org/content/animal-nutrition-beyond-boundaries-feed-and-feeding>
- Makkar, H.P.S. & Beever, D. (2013). Optimization of feed use efficiency in ruminant production systems. Proceedings of the FAO Symposium, 27 November 2012, Bangkok, Thailand. FAO

- Animal Production and Health Proceedings, No. 16. Rome, FAO and Asian-Australasian Association of Animal Production Societies.
- Matsushima, J. K. (1979). Classification of Feeds. In: Feeding Beef Cattle. Advanced Series in Agricultural Sciences, vol 7. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-67199-9_2
- Riaz, M. N. & Rokey, G. J. (2011). Extrusion Problems Solved: Food, Pet Food and Feed. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Elsevier.
- Richi Machinery, 2026. Feed Processing Technology, Accessed on 25 June 2026, available online at: <https://www.richimachinery.com/customer-guide/the-effect-of-animal-feed-processing-technology-on-feed-nutrition.html>
- Ruiz, F. A., Vázquez, M., Camúñez, J. A., Castel, J. M. & Mena, Y. (2020). Characterization and challenges of livestock farming in Mediterranean protected mountain areas (Sierra Nevada, Spain). *Spanish Journal of Agricultural Research*, 18(1), e0601.
- Schoeff, R.W., Fairchild, F.J., Bursiek, B. & Castaldo, D. (2005). Feed industry and information. Schofield, Ch. E.K. (Ed.), *Feed Manufacturing Technology V*, American Feed Industry Association, Arlington, VA, USA
- Thomasa, M. & van der Poel, A. F. B. (2020). Fundamental factors in feed manufacturing: Towards a unifying conditioning/pelleting framework. *Animal Feed Science and Technology*, 268, 114612.
- Yemsa Makine. (2025). What is Pellet Machine? Working Principle and Usage Areas, Accessed on 25 June 2026, available online at: <https://www.yemsa.com.tr/en/what-is-pellet-machine-working-principle-and-usage-areas/ik.gov.tr/>

**SAFFLOWER (*Carthamus tinctorius* L.) CULTIVATION AND MULTIPURPOSE USE
POTENTIAL**

Prof. Dr. Belgin COŞGE ŞENKAL

Yozgat Bozok University, Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Yozgat-Türkiye

Email: belgin.senkal@yobu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7330-8098>

Abstract

Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) is an important annual, drought-tolerant oilseed plant belonging to the Asteraceae family, with potential for multipurpose use. Plant height varies depending on genotype, environment, and growing conditions. The stem grows erect, and heads form on lateral branches emerging from the main stem. Leaves are generally sessile, with serrated edges, and spiny in some genotypes. Safflower varieties can be spiny or spineless. Due to its deep taproot system, low water requirements, and adaptability to marginal areas, it is considered an alternative industrial crop, especially for semi-arid and arid regions. Safflower cultivation is important primarily for seed oil production, but also for petal-derived products, natural dyes, functional foods, feed, biodiesel, cosmetics, and medicinal uses. In recent years, safflower research has focused on drought tolerance, developing genotypes suitable for autumn planting, fatty acid composition, petal bioactive compounds, wild species introgression, and molecular breeding. To improve safflower cultivation in Türkiye, factors such as region-appropriate variety selection, early planting, correct plant density, fertilization based on soil analysis, limited irrigation strategies, and market-oriented quality targets should be considered together. Future research should prioritize drought tolerance, autumn planting, fatty acid composition, petal bioactive, and molecular breeding. In this study, the botanical characteristics, ecological requirements, cultivation techniques, quality characteristics, and uses of safflower were evaluated considering current literature data.

Keywords: *Carthamus tinctorius* L., sowing time, harvesting, oil content, flower yield

1. Introduction

The vegetable oil deficit, climate change, rising production costs, and the dependence of agricultural production on a limited number of products are increasing the importance of alternative oilseed crops (Wang et al., 2022). Safflower is an important oilseed crop that has been cultivated for a very long time. Safflower is one of the species that stands out in this context due to its adaptation to arid and semi-arid conditions, deep root system, adaptability to different planting times, and numerous uses. Especially in cereal-based rotation systems, the inclusion of a broad-leaved plant like safflower can contribute to diversifying the crop pattern and reducing some weed, disease, and soil tillage problems (Manikanta et al., 2023). The superiority of safflower is not limited only to its adaptation to drought. There is wide variation among genotypes in terms of oil content, fatty acid composition, spininess, flower color, development period, cold resistance, and yield components (Shahid et al., 2020; Tonguç et al., 2023). This variation constitutes an important genetic resource for variety development programs for different uses. This study evaluated safflower cultivation and uses using current literature data.

2. Systematics and Origin of Safflower

Safflower is an oilseed plant belonging to the genus *Carthamus* in the family Asteraceae. The taxonomy of the plant is:

Order: Asterales

Family: Asteraceae

Genus: *Carthamus*

Species: *Carthamus tinctorius* L. 2n=24 (Singh and Nimbkar, 2006; Rabbani, 2026).

It is known that there are about 25 species in the genus *Carthamus*. It is generally accepted that these species have a distribution area from North Africa, the Near East and Spain to India, and that many of these species are plants of the natural flora of countries located in the Mediterranean basin. Molecular and population genetics findings indicate that the origin of the species is most likely based on the Fertile Crescent/Near East–Levant line. Chapman and Burke (2007), in their phylogenetic analysis based on seven nuclear gene regions, found that the closest wild relative of cultivated safflower is *Carthamus palaestinus* Eig; *C. oxyacanthus* M. Bieb. and *C. persicus* Desf. ex Willd. reported that *C. tinctorius* is located further away from cultivated safflower. The same study indicated that *C. tinctorius* showed lower nucleotide diversity compared to its wild ancestor, suggesting a genetic bottleneck during the domestication process. Subsequent microsatellite-based population genetics studies revealed that safflower originated in the Near East and that genetic clusters encompassing the Türkiye–Iran–Iraq–Afghanistan and Israel–Jordan–Syria lines were significant for the species' early spread (Chapman et al., 2010). Current GBS-based phylogenomic analyses support the view that *C. palaestinus* is the single closest progenitor for *C. tinctorius*, strengthening the idea that the Levant region was the center of safflower domestication (Sardouei-Nasab et al., 2023). When these findings are considered together, it can be concluded that historically suggested centers of diversity for safflower, such as India, Ethiopia, or Afghanistan, are more likely areas of secondary spread and local adaptation; The primary origin and domestication center can be said to be the Near East–Levant/Fertile Crescent belt (Figure 1). The natural distribution area of this species extends from Central and Eastern Türkiye to Iran.

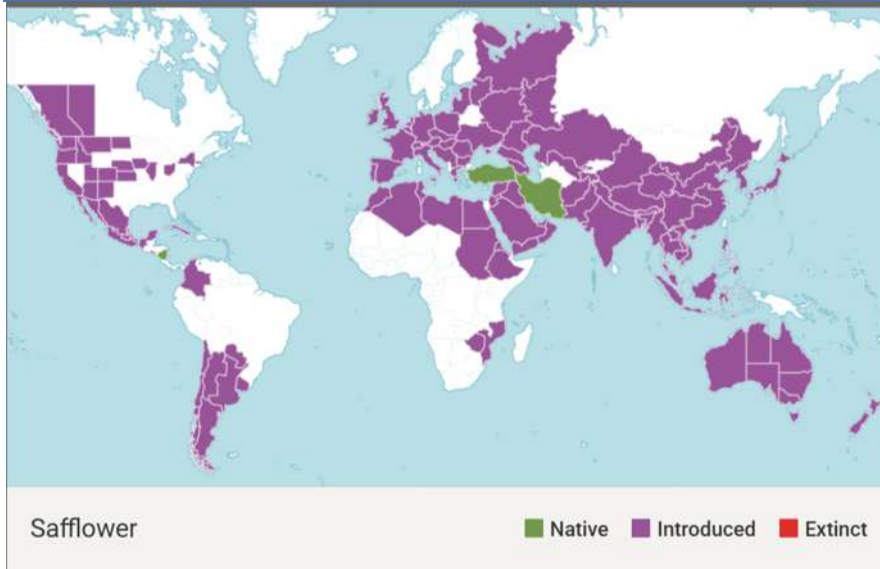


Figure 1. Global native and introduced distribution of safflower.
(Source: <https://www.kew.org/plants/safflower> Access date: 18.06.2026)

There are 10 *Carthamus* taxa in the Flora of Türkiye. These:

- Carthamus caeruleus* L.
- Carthamus dentatus* (Forssk.) Vahl
- Carthamus glaucus* M.Bieb.
- Carthamus glaucus* subsp. *glaucus* M. Bieb.
- Carthamus lanatus* L.
- Carthamus persicus* Desf. ex Willd.
- Carthamus tenuis* (Boiss. & Blanche) Bornm.
- Carthamus tenuis* subsp. *gracillimus* (Rech.f.)
- Carthamus tenuis* subsp. *tenuis* (Boiss. & Blanche) Bornm.
- Carthamus tinctorius* L. (Hacıoğlu, 2012)

3. Plant Characteristics

Root: It is a taproot plant. Its roots can reach depths of 2-3 m depending on the soil structure. In this way, it makes extensive use of water and plant nutrients from the depths of the soil. Its greater resistance to arid conditions compared to other oilseed plants stems from this characteristic. Lateral roots attached to the taproot are well developed.

Stem: It has an upright and sturdy structure. The stem cross-section is round and cylindrical, and its thickness varies between 1.0-3.5 cm. The stem color is light green or whitish gray in the young stage, and it turns yellow with maturity. Secondary branches sometimes appear on the lateral branches. The number of lateral branches in the plant varies between 10-30 depending on the variety and soil fertility. A height of 1-1.5 m plant is recommended for mechanized farming.

Leaf: Safflower leaves are arranged opposite or alternately on the main stem and lateral branches. The leaf shape is narrow and long, and the leaf edges are serrated. The leaves are dark green, and in spiny varieties, the edges and partially the surface of the leaves are spiny.

Flowers: Located in a small cluster at the end of the main stem and lateral branches. The diameter of the cluster is 2-5 cm. The number of clusters per plant varies between 5-50. In safflower, the flowers on the clusters on the first lateral branches bloom, followed by the secondary branches. Therefore, the flowering period of a plant varies between 10-40 days. The sepals and petals are fused inside the bracts. Flower colors can vary from whitish yellow to orange-yellow, orange, and red. Flowers have 5 stamens and 1 pistil. Cross pollination can be observed in 5-10% of cases.

Fruit and seeds: The seed shape is like sunflower seeds. The seed color is white. The weight of 1000 seeds vary between 30-45 g. The seeds contain 35-48% oil and approximately 20% protein (Yorulmaz et al., 2019).

4. Safflower Cultivation

Soil Preparation: Since safflowers are sensitive to weeds in its initial growth phase, a weed-free seedbed must be prepared. The field should be plowed in the autumn. Before planting, it should be prepared with a disc harrow or cultivator-rake. Performing these operations immediately before planting will eliminate weeds and parasites that will emerge in the spring, thus preparing a clean environment for safflower.

Planting Time: The best planting time for summer safflower is March-April. Early plantings will delay emergence due to insufficient soil temperature. Late plantings will result in significant decreases in seed yield. Winter plantings must be done in October.

Planting Density: For safflower, the row spacing should be around 25-30 cm for a suitable planting density. **Planting Depth:** The most suitable planting depth for safflower is 3-4 cm. Deeper plantings will cause emergence problems (Steberl et al., 2020).

Fertilization: For safflower grown in dry conditions, 5-6 kg of N equivalent nitrogen fertilizer and 4-5 kg of P equivalent phosphorus fertilizer per decare are calculated. Since fertilizer is usually applied at once with sowing, 20-20-0 fertilizer is the most suitable fertilizer.

Irrigation: Safflower is known as a drought-tolerant plant and is therefore grown without irrigation. If spring rains are insufficient between the stem elongation and flowering stages, yield losses increase. In these conditions, irrigation should be done if possible. In irrigated conditions, the most critical periods for safflower are stem elongation-branching, budding-flowering, and early seed filling. The number and amount of irrigations should be determined according to soil depth, available water holding capacity, rainfall, and target yield.

Harvest Time: It is necessary to carefully adjust the harvest time. Early harvesting can cause problems due to excess moisture in the crops, while late harvesting can lead to seed shattering problems. In Central Anatolia, the winter safflower harvest time is July 25-August 5. For summer safflower, the harvest time is August 15-25.

4.1. Safflower Cultivation Area, Production, and Seed Yield in the World and Türkiye

Safflower is a small-scale crop compared to major oilseed crops such as sunflower, soybean, rapeseed, and cottonseed. Production is highly variable from year to year, strongly influenced by the annual planting decisions and climatic conditions of a small number of countries.

According to FAOSTAT data, world safflower seed production reached one of its highest levels in recent years in 2022 with 995,508 tons but decreased to 723,875 tons in 2023. This change corresponds to a decrease of approximately 27.3% in one year. The main reason for the increase in 2022 was high production in Kazakhstan and Russia.

Distribution of World Production by Country: In 2023, the main producing countries were ranked as follows:

Table 1. Major safflower-producing countries in 2023.

Rank	Country	Production (tons)	World Share (%)
1	Kazakhstan	242.172	33.5
2	Russia	137.957	19.1
3	India	90.002	12.4
4	Mexico	65.760	9.1
5	USA	59.230	8.2
Total of the top five countries		595.121	82.2
World total		723.875	100.0

Therefore, approximately four-fifths of world safflower production is controlled by five countries. This high concentration means that changes in cultivated area, particularly in Kazakhstan and Russia, significantly affect the world total.

According to FAOSTAT's current source reflecting 2024 country data, Kazakhstan ranks first with 228.717 tons. Production in Russia is reported at approximately 159.610 tons, with Mexico rising to

third place. The same source shows that statistically recorded safflower production existed in 17 countries in 2024.

World cultivated areas and growing regions: In 2024, Kazakhstan alone reported a safflower harvest area of 316.504 hectares. Kazakhstan is followed by Russia and India. This shows that most world safflower areas are concentrated in the arid and semi-arid steppe belt of Eurasia.

World yield level: World safflower yield is highly variable depending on the production systems. In rain-fed production systems, average yields are generally around 0.7–1.2 t ha⁻¹, while in irrigated or more favorable systems they can reach 1.5–2.5 t ha⁻¹. However, FAOSTAT's country comparison reported a high national average of approximately 2.577 kg ha⁻¹ in Pakistan in 2022, while average yields in countries such as Australia and Tanzania remained at around 0.5–0.6 t ha⁻¹. These differences are related to irrigation, soil depth, variety, production purpose, and the size of the statistically cultivated area.

Safflower Production in Türkiye During 2015–2025

Safflower production in Türkiye reached a high level in 2015, followed by a significant decrease in planting area. The lowest production was observed in 2021; partial recovery was achieved in 2022 and 2023, and a decline occurred again in 2024.

Table 2. Safflower cultivation area, production, and yield in Türkiye, 2015–2025

Year	Sowing/Harvest Area , da	Production, ton	Yield, kg da⁻¹
2015	431 071	70 000	162
2016	395 710	58 000	147
2017	273 762	50 000	183
2018	246 932	35 000	142
2019	158 601	21 883	138
2020	151 150	21 325	141
2021	145 882	16 200	111
2022	262 375	30 000	114
2023	321 298	39 000	121
2024	254 175	29 000	114
2025	266 192	28 087	106

<https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/statistical-themes> Accessed: 18.06.2026

5. Potential for Multipurpose Use of Safflower

5.1. Use in Human Nutrition

The main product of safflower today is edible vegetable oil. The method of use of the oil varies according to its fatty acid composition. High linoleic oils are particularly suitable for cold consumption and nutritional purposes; high oleic oils can be used for cooking, frying, and processed food applications requiring higher oxidative stability. Instead of direct consumption of crude oil, it is necessary to standardize the oil in terms of free fatty acids, peroxide value, phospholipids, pigments, volatile components, and oxidative stability. Variety, growing conditions, harvest time, and storage conditions can affect the technological quality of the oil.

5.2. Animal Feed

The safflower meal obtained after the oil extraction process can be used as a protein and energy source. However, the quality of the meal depends on the seed hull ratio and the oil extraction method. In materials with a high hull ratio, crude cellulose increases, digestibility and energy value per unit weight decrease. Meal produced from seeds with thin hulls or partially hulls is more advantageous in terms of feed value. The level of safflower meal inclusion in the ration should be determined considering animal species, age, production direction, fiber content of the meal, amount of residual fat, and possible

antinutritional components. Safflower meal should not be considered a direct equivalent to soybean or sunflower meal without standard feed analyses and, if necessary, digestibility studies.

5.3. Petals and Natural Dyes

Safflower's yellow, orange, and red petals have historically been used as a source of natural dyes in food, textile, and art applications. The main colorants include carthamin, which gives a red color, and water-soluble yellow pigments.

In a study conducted in semi-arid conditions in Türkiye, it was reported that petal harvesting time, variety, and year affected some morphological and yield characteristics; however, total dye content showed a more stable property. The Dinçer variety stood out in terms of dry petal yield and total dye content (Kızıl et al., 2008).

For petal production to become economically viable, the mechanization of the harvesting process, drying temperature, extraction of colorants, and standardization of the final product must be addressed. Since manual harvesting has high labor costs, it may only be economically viable in high-value natural dye, herbal tea, or functional product markets.

5.4. Medicinal and Pharmaceutical Uses

Safflower flowers and some safflower-derived compounds have been used in traditional medicine systems related to circulation, pain, inflammation, and various metabolic disorders. The flowers contain flavonoids, quinochalcone derivatives, and various phenolic compounds. Experimental studies related to antioxidants, anti-inflammatory, anticoagulant, and cardiovascular effects have been reported in the literature (Gomashe et al., 2021).

However, findings from conventional use or cell-animal experiments should not be directly interpreted as clinical efficacy. Standardized data are needed regarding extraction method, active substance dose, bioavailability, toxicity, drug interactions, and clinical safety. Therefore, presenting safflower flowers or their extracts as medicinal products requires different regulatory and toxicological evaluations than their use as food or herbal tea.

5.5. Biodiesel and Oleo chemistry

Safflower oil can be converted to biodiesel via transesterification due to its triglyceride structure. High oleic varieties are more advantageous in biofuel and biolubricant production in terms of oxidative stability. While high linoleic oils may offer certain advantages in terms of cold flow properties, their oxidative stability is lower. Safflower genotypes studied under semi-arid conditions in Brazil showed an oil content of 32–34%, revealing their potential as biodiesel feedstock. However, significant differences in grain yield were observed among the genotypes (Silva et al., 2021).

Beyond biodiesel, safflower oil can be used in the production of paints, varnishes, alkyd resins, surface coatings, bio-based polymers, soaps, cosmetics, and biolubricants. Economic success in these areas depends not only on oil yield but also on fatty acid composition, supply continuity, and price competitiveness with petroleum-based feedstocks.

5.6. Beekeeping, Ornamental Plants, and Bird Feed

Safflower flowers can be evaluated for beekeeping as a source of pollen and nectar. Safflower fields can be integrated into beekeeping systems by determining the relationship between the flowering period and other nectar sources in the region. However, pesticide applications should be limited during the flowering period.

Thornless and showy flowering genotypes can be used in cut flower and dried flower production. Seeds are also used in cage bird and wild bird feed. In these areas of use, seed color, seed size, hull characteristics, and product cleanliness may become more important than oil content.

5.7. Harvest Residues and Biorefinery Approach

Safflower stalks and heads can be used directly as low-quality roughage in limited ways; they have more potential for evaluation as biomass, pellets, briquettes, compost, biochar, and lignocellulosic raw materials. Evaluating the seed, oil, meal, hull, petals, and stalk in the same production chain can increase economic stability compared to oil-based systems. The methods of using the safflower plant are summarized in Table 3

Table 3. Multipurpose uses of the safflower plant.

Plant Part	Primary Product	Secondary Use
Seed	Edible or industrial oil	Bird feed, functional ingredient
Cake	Protein feed	Protein concentrate, fermentation substrate
Hull	Fibrous byproduct	Fuel, biochar, composite
Petal	Natural dye, tea	Phenolic and pigment extract
Stem and head	Biomass	Pellets, briquettes, compost, biochar

6. Conclusion and Recommendations

Safflower is an important alternative oilseed crop for arid and semi-arid agricultural systems, but its success depends on the combined consideration of appropriate genotype, planting time, soil depth, water management, and market organization. The species' deep root system strengthens its adaptation to drought; however, severe water stress during flowering and grain filling periods cannot be prevented from reducing yield and oil production.

In Turkish conditions, early planting is one of the fundamental agronomic practices for high yields, especially in Southeastern Anatolia. In the Mediterranean and coastal regions, winter cultivation offers a significant option, provided that winter-hardy genotypes are used. In Central Anatolia, early spring planting, selection of deep soils, and integration into cereal-based rotation should be prioritized.

The economic value of safflower should not be limited solely to crude oil production. When considered together with high oleic food and industrial oil, high linoleic nutritional oil, natural dyes and petal products, feed meal, birdseed, biodiesel, biolubricant, and biomass, the total added value of the product can be increased. To ensure the sustainable expansion of production, it is necessary to develop region-specific varieties, strengthen the certified seed system, market high-oleic and high-linoleic products in separate value chains, implement contract farming, and value-based pricing. Research programs should consider not only grain yield but also oil yield, fatty acid stability, water use efficiency, petal yield, and total economic value.

References

- Chapman, M. A., & Burke, J. M. (2007). DNA sequence diversity and the origin of cultivated safflower (*Carthamus tinctorius* L.; Asteraceae). *BMC Plant Biology*, 7, 60. DOI: 10.1186/1471-2229-7-60.
- Chapman, M. A., Hvala, J., Strever, J., & Burke, J. M. (2010). Population genetic analysis of safflower (*Carthamus tinctorius*; Asteraceae) reveals a Near Eastern origin and five centers of diversity. *American Journal of Botany*, 97(5), 831–840.
- Gomashe, S., Ingle, K., Sarap, Y. A., Chand, D., & Rajkumar, S. (2021). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.): An underutilized crop with potential medicinal values. *Annals of Phytomedicine*, 10(1): 242-248.
- Hacıoğlu, B.T. (2012). *Carthamus*. In this site: Bizimbitkiler (2013). <<http://www.bizimbitkiler.org.tr>>, [accessed: 18 06 2026].
- Kızıl, S., Cakmak, O., Kırıcı, S., & İnan, M. (2008). A comprehensive study on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in semi-arid conditions. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 22, 947–953.
- Manikanta, C., Pasala, R., Kaliamoorthy, S., Basavaraj, P. S., Pandey, B. B., Vadlamudi, D. R., Nidamarty, M., Guhey, A., & Kadirvel, P. (2023). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) crop adaptation to residual moisture stress: conserved water use and canopy temperature modulation are better adaptive mechanisms. *PeerJ*, 11, e15928. <https://doi.org/10.7717/peerj.15928>
- Rabbani M.T. 2026. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.): A Comprehensive Review of Its Diverse Applications and Recent Advances in Genetic Improvement. *International Journal of Plant & Soil Science*. 38(1):308-337

- Sardouei-Nasab, S., Nemati, Z., Mohammadi-Nejad, G., Haghi, R., & Blattner, F. (2023). Phylogenomic investigation of safflower (*Carthamus tinctorius*) and related species using genotyping-by-sequencing (GBS). *Scientific Reports*, 13, 6212.
- Shahid, M., Jaradat, A., & Rao, N. (2020). Safflower: A multipurpose crop for the marginal lands. In *Emerging Research in Alternative Crops* (pp. 279–294). Springer.
- Silva, R. A. G. D., Silva Filho, E., Costa, M., Gracindo, Â. P. A. C., Pessoa, P. M. A., Gondim, A. D., Medeiros, L. R., & Lichston, J. (2021). Oil quality and yield of different *Carthamus tinctorius* cultivars: Promising oilseeds for biodiesel in semi-arid regions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 98, 241–251.
- Singh, V., & Nimbkar, N. (2006). Safflower(*Carthamus tinctorius* L.). In R. J. Singh(Ed.), *Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement* (1sted., pp. 167–194). CRC Press.
- Steberl, K., Hartung, J., Munz, S., & Graeff-Hönninger, S. (2020). Effect of Row Spacing, Sowing Density, and Harvest Time on Floret Yield and Yield Components of Two Safflower Cultivars Grown in Southwestern Germany. *Agronomy*, 10(5), 664. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050664>
- Tonguç M., Önder S., Erbaş S. 2023. Variations in seed oil and chemical composition among the safflower genotypes (*Carthamus tinctorius* L.). *Not Bot Horti Agrobi* 51(1):13045
- Wang, Q.-J., Feng, G.-F., Wang, H.-J., Chang, C.-P., 2022. The influence of political ideology on greenhouse gas emissions. *Global Environmental Change* 74, 102496. (PDF) [Impact of Climate Change on the Production of Edible Oilseeds Crops in Pakistan](#).
- Yorulmaz A., Yıldırım A., Ünay A. 2019. Classification of Turkish safflower oils based on their fatty acid and sterol profiles using multivariate techniques *Croat. J. Food Sci. Technol.* (2019) 11 (2) 259-265

EVALUATION OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN SEED YIELD AND YIELD COMPONENTS IN SAFFLOWER (*Carthamus tinctorius* L.) GROWN UNDER RAINFED (NON-IRRIGATED) CONDITIONS USING MULTIVARIATE ANALYSIS METHODS

Prof. Dr. Belgin COŞGE ŞENKAL

Yozgat Bozok University, Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Yozgat-Türkiye

Email: belgin.senkal@yobu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7330-8098>

Abstract

Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) is an important annual oilseed plant belonging to the Asteraceae family, which can be grown in both spring and autumn planting systems. Its deep root system allows it to adapt to drought and efficiently utilize soil water and nutrients. Improving seed and oil yield requires identifying yield components that have direct and indirect effects on productivity. This study evaluated the relationships between seed yield and yield-related characteristics in seven safflower varieties grown under rainfed conditions at the Agricultural Application and Research Center of Yozgat Bozok University. The experiment was designed according to a randomized block design with three replications. Plant height, number of branches, main head diameter, seed yield, 1000 seed weight, oil content, oil yield, and harvest index were determined. Data were evaluated using descriptive statistics, analysis of variance, Pearson correlation, principal component analysis, hierarchical clustering, and path analysis. Varieties differed significantly in terms of 1000 seed weight, oil content, and oil yield, while no significant differences were observed at the $p < 0.05$ level in terms of plant height, number of branches, head diameter, seed yield, and harvest index. Seed yield was strongly correlated with oil yield ($r = 0.861$), but this relationship is partly a consequence of the mathematical dependence of oil yield on seed yield. Path analysis revealed that 1000 seed weight and head diameter had the greatest positive direct effect on seed yield, while plant height and number of branches showed negative direct effects after controlling for the remaining variables. The results suggest that 1000 seed weight and head diameter may be useful selection criteria, but their effects should be interpreted in conjunction with environmental variation and multivariate trait relationships.

Keywords: Yield, oil content, correlation, responsible production, sustainable production

1. Introduction

Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) is an important oilseed annual crop belonging to the Asteraceae family, suitable for both spring and autumn cultivation. It is a drought-tolerant, versatile plant grown not only for its oil but also for its petals, from which an orange-red dye (cartamin) is obtained. Petals have various medicinal properties and are beneficial in the treatment of many chronic diseases. Safflower seed oil is a rich source of polyunsaturated fatty acids and is widely preferred by consumers worldwide. It is used in food, medicine, and cosmetics (Baljani et al., 2015; Vosoughkia et al., 2011). Safflower utilizes nutrients and water from the soil very well thanks to its deep root system. This contributes positively to the plant's drought tolerance (Zeinalzadeh-Tabrizi et al., 2025). Due to this characteristic, Central Anatolia and regions with similar ecologies are the most suitable areas for safflower cultivation (Köse et al., 2021). Worldwide, safflower breeding research is based on varieties with high seed yield and oil content (Mousavi Ojaq et al., 2020). Seed yield and harvest index are critical characteristics in safflower breeding studies, and there is an inverse relationship between seed yield and oil content (Zeinalzadeh Tabrizi et al., 2025). One of the challenges encountered in safflower cultivation is the need for varieties with high yield potential that can effectively withstand a wide range of environmental conditions. Important characteristics for increasing safflower yield include plant height, number of branches, and thousand-seed weight, and these serve as selection criteria (Afzal et al., 2017). To achieve success in plant breeding studies, it is crucial to meticulously define breeding objectives. In general, the main goal in safflower breeding is to develop varieties with high yield capacity. Identifying the characteristics that affect seed and oil yield in safflower is crucial for achieving genetic improvement in these traits (Pahlavani et al., 2012). Yield is a quantitative character resulting from the interaction of different characters (Ali et al., 2003). When it comes to obtaining high-yielding genotypes, it is necessary to know how and to what extent yield-related characters affect yield (Hapsari et al., 2021). Yield components not only directly affect yield but can also have indirect effects by positively or negatively influencing other yield components (Wang et al., 2011). Various statistical methods (correlation, regression, path analysis, principal component analysis, clustering, etc.) are used for this purpose. This study aimed to evaluate the relationships between seed yield and yield components in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) using multivariate statistical methods such as correlation, regression, and path analysis.

2. Materials and Methods

Seven safflower cultivars (cv. Linas, cv. Olas, cv. Dinçer, cv. Göktürk, cv. Yekta, cv. Balcı, and cv. Zirkon) were used as material in this study. The research was conducted at the Research and Application area (39°75'0" N, 34°80'0" E) of the Agricultural Application and Research Center of Yozgat Bozok University in Divanlı (Center/Yozgat/TÜRKİYE). The field experiment was established according to a randomized block design with three replications. In the experiment, seeds were sown by hand in rows opened with a row spacing 30 cm, a row length of 3 m, and 5 rows in each plot. Sowing was done in April. After emergence, thinning and weed control were carried out when the plants reached 15 cm. The plants were grown without irrigation, and measurements were taken from randomly selected plants from each plot at harvest maturity (Karaca Öner and Şeker, 2020; Arslan and Güler, 2022).

2.1. Measurements and Analyses

1. Plant height (cm)
2. Number of branches (no. plant⁻¹)
3. Main head diameter (mm)
4. Seed yield (kg da⁻¹)
5. Thousand-seed weight (g)
6. Oil content (%)
7. Oil yield (kg da⁻¹)
8. Harvest index (%)

2.2. Statistical Analyses

The following statistical analyses were performed using the findings obtained from the research. TARİST and MINİTAB statistical programs were used in the analyses (Açıkgöz et al., 2004; Akgün and Türkay, 2025).

- 1- Descriptive Statistics (Mean, Standard Deviation, Coefficient of Variation, Minimum-Maximum Values)
- 2- Correlation Analysis (Pearson Correlation Analysis aims to identify yield components with the strongest relationship to seed yield)
- 3- Principal Component Analysis (PCA);
 - To reduce the number of yield components used in the research to a smaller number of components,
 - To identify the key factors affecting seed yield, and
 - To visualize similarities and differences between varieties.
- 4- Clustering Analysis This analysis will group safflower varieties according to yield and yield components. Similar varieties will also be identified.
- 5- Path Analysis This analysis will identify yield components that have direct and indirect effects on seed yield in safflower.

3. Findings and Discussion

3.1. Descriptive Statistics

Descriptive statistics data of the safflower cultivars included in the study, such as plant height, number of branches, main head diameter, seed yield, 1000-seed weight, oil content, oil yield, and harvest index, are presented in Table 1.

Table 1. Descriptive statistical data of the examined traits of safflower cultivars.

Trait	Mean	SD	SE	CV (%)	Min.	Max.
Plant Height (cm)	63.70	9.25	2.02	14.53	33.67	77.37
Number of branches (no. plant ⁻¹)	6.00	1.38	0.30	23.04	4.33	8.67
Main Head Diameter (mm)	25.51	1.89	0.41	7.40	22.68	29.20
Seed Yield (kg da ⁻¹)	168.41	37.59	8.20	22.32	85.56	233.33
1000 seed weight (g)	37.85	1.81	0.39	4.77	35.62	41.40
Oil Content (%)	33.41	3.90	0.85	11.67	27.30	38.41
Oil yield (kg da ⁻¹)	56.25	13.56	2.96	24.10	25.83	77.27
Harvest Index (%)	34.84	5.09	1.11	14.61	27.00	44.77

Table 1 shows that there are varying degrees of variability in the morphological, yield, and quality characteristics considered in safflower cultivars. The average plant height was 63.70 cm, ranging from 33.67 to 77.37 cm, and the coefficient of variation for this characteristic was calculated as 14.53%. The average number of lateral branches was 6.00 per plant⁻¹; the coefficient of variation of 23.04% indicates a significant difference in branching characteristics between varieties or observations. The average main head diameter was determined as 25.51, and this characteristic showed a relatively more stable structure among the morphological characteristics with a coefficient of variation of 7.40%. The average seed yield was 168.41 kg da⁻¹, with values ranging from 85.56 to 233.33 kg da⁻¹. The coefficient variation of 22.32% determined for seed yield shows that there is wide variability in yield potential among cultivars. Similarly, oil yield was determined to be an average of 56.25 kg da⁻¹ and ranged from 25.83 to 77.27 kg da⁻¹. The fact that oil yield had the highest coefficient of variation at 24.10% indicates that this trait is more sensitive to genotypic differences and variations in seed yield and oil content. 1000 seed weight averaged 37.85 g and showed a narrow range between 35.62 and 41.40 g. The coefficient of variation for this trait was the lowest among the examined traits at 4.77%, revealing that 1000 seed weight is more stable compared to other traits. Oil content was determined to be an average of 33.41%; the lowest and highest values were 27.30% and 38.41%, respectively. The coefficient variation for oil content of 11.67% indicates a moderate difference in oil accumulation among the cultivars. The harvest index averaged 34.84%, ranging from 27.00% to 44.77%, and the coefficient of variation was calculated as 14.61%.

Overall, the highest variability was observed in oil yield, number of branches, and seed yield; the lowest variability was observed in 1000 seed weight and main head diameter.

3.2. Analysis of Variance and Mean Grouping

As a result of the analysis of variance of the research conducted according to the Randomized Block Design, statistically significant differences were determined among safflower cultivars in terms of 1000 seed weight, oil content, and oil yield. In contrast, no significant differences were found between the cultivars in terms of plant height, number of branches, main head diameter, seed yield, and harvest index at the $p < 0.05$ level (Table 2).

Table 2. Analysis of variance table for the examined characteristics of safflower cultivars.

Trait	Var. F	Var. p	Sig.	Blk F	Blk p	MSE	CV (%)
Plant Height (cm)	2.651	0.0711	ns	0.557	0.5872	59.017	12.060
Number of Branches (no. plant ⁻¹)	0.843	0.5606	ns	2.168	0.1571	1.787	22.277
Main Head Diameter (mm)	2.058	0.1354	ns	0.054	0.9472	2.914	6.691
Seed Yield (kg da ⁻¹)	1.968	0.1499	ns	1.930	0.1876	1021.626	18.979
1000 Seed Weight (g)	17.517	0.0000	***	4.518	0.0345	0.518	1.901
Oil Content (%)	69.589	0.0000	***	1.750	0.2154	0.703	2.509
Oil Yield (kg da ⁻¹)	3.707	0.0255	*	1.718	0.2207	97.576	17.561
Harvest Index (%)	0.938	0.5033	ns	2.076	0.1682	23.800	14.005

Overall, the results show that the safflower cultivars used in the study have different genetic potentials, particularly in terms of seed size, oil content, and oil yield. These characteristics can be considered as distinctive selection criteria in variety selection and breeding studies. The insignificant effect of variety on seed yield indicates that the varieties exhibited similar yield levels under experimental conditions, or that the true differences between varieties were not sufficiently pronounced due to environmental variability.

Table 3. Grouping of characteristics examined in safflower cultivars.

Cultivar	PH ¹	NB	MHD	SY	1000 SW	OC	OY	HI
LİNAS	73.37	5.67	24.69	194.82	40.68 a	37.77 a	73.56 a	35.55
DİNÇER	70.06	6.89	26.48	198.52	39.84 a	27.88 d	55.48 b	38.58
ZİRKON	66.53	5.56	28.33	182.22	36.66 c	31.56 c	57.53 ab	33.69
OLAS	60.38	6.44	24.84	149.63	36.57 c	37.92 a	56.80 ab	30.34
BALCI	60.23	5.67	24.92	164.07	36.78 bc	35.05 b	57.60 ab	35.15
YEKTA	58.48	5.00	24.34	164.07	36.45 c	34.77 b	56.99 ab	33.25
GÖKTÜRK	54.87	6.78	25.00	125.56	37.96 b	28.95 d	35.79 c	37.28
LSD _{0.05}	13.667	2.378	3.037	56.862	1.280	1.491	17.573	8.679

¹PH: Plant Height, NB: Number of Branches, MHD: Main Head Diameter, SY: Seed Yield, 1000 SW: 1000 Seed Weight, OC: Oil Content, OY: Oil Yield, HI: Harvest Index

3.3. Pearson Correlation Analysis

The highest Pearson correlation coefficient among the characteristics was found between seed yield and oil yield ($r = 0.861$). However, since oil yield is a composite result of seed yield and oil content, this high relationship partly reflects mathematical dependence and should not be considered an independent cause-and-effect relationship. The positive relationship between plant height and 1000 seed weight ($r = 0.628$) indicates that taller plants tend to produce larger seeds. While moderately positive relationships

were observed between oil content and oil yield ($r = 0.486$) and between the number of branches and the main head diameter ($r = 0.410$), the relationship between oil content and harvest index ($r = -0.301$) and main head diameter ($r = -0.296$) was negative (Table 4).

Table 4. Pearson Correlation Analysis

Trait	PH ¹	NB	MHD	SY	1000 SW	OC	OY	HI
PH	1.000	0.134	0.299	0.045	0.628	0.153	0.148	0.136
NB	0.134	1.000	0.410	-0.247	0.220	-0.166	-0.286	0.086
MHD	0.299	0.410	1.000	0.209	-0.023	-0.296	0.057	0.174
SY	0.045	-0.247	0.209	1.000	0.286	-0.016	0.861	0.250
1000 SW	0.628	0.220	-0.023	0.286	1.000	-0.090	0.232	0.339
OC	0.153	-0.166	-0.296	-0.016	-0.090	1.000	0.486	-0.301
OY	0.148	-0.286	0.057	0.861	0.232	0.486	1.000	0.072
HI	0.136	0.086	0.174	0.250	0.339	-0.301	0.072	1.000

¹PH: Plant Height, NB: Number of Branches, MHD: Main Head Diameter, SY: Seed Yield, 1000 SW: 1000 Seed Weight, OC: Oil Content, OY: Oil Yield, HI: Harvest Index

3.4. Principal Component Analysis (PCA)

Principal component analysis was performed for seven characteristics excluding oil yield. The first three components explained 69.22% of the total variance. In PC1, 1000 seed weight, plant height, harvest index, and main head diameter showed a positive correlation; in PC2, oil content showed a positive correlation, while number of lateral branches and main head diameter showed a negative correlation. Narrow angles between vectors indicate a positive relationship, while opposite directions indicate a negative relationship. The close proximity of the plant height and 1000 seed weight vectors support the positive correlation in the correlation matrix. Similarly, number of lateral branches and main head diameter are in the same direction, while oil content is in the opposite direction to these characteristics and the harvest index. DİNÇER is located at the positive end of PC1, related to morphological size and seed size; LİNAS is located at the positive end of PC2, related to oil content and seed yield. YEKTA and OLAS are close to the oil content vector, while ZİRKON and GÖKTÜRK are closer to the sub-region where number of lateral branches and main head diameter are located. Since the explanatory power of the first two components is 50.86%, the distinction between closely related varieties should not be finalized without considering PC3 and subsequent components (Figure 1).

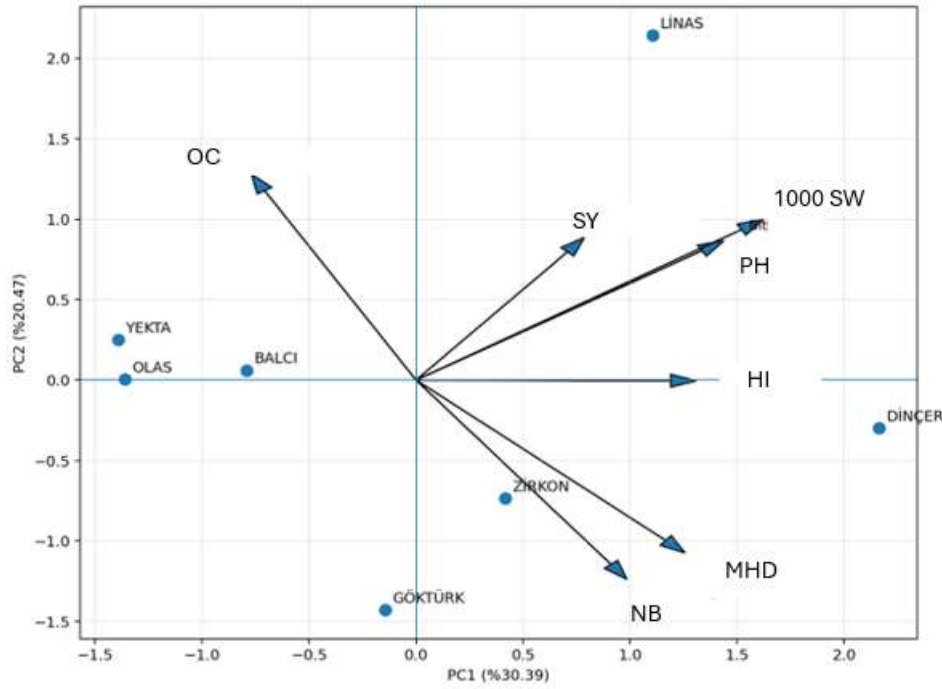


Figure 1. PC1–PC2 biplot showing variant loads with mean values.
(1PH: Plant Height, NB: Number of Branches, MHD: Main Head Diameter, SY: Seed Yield, 1000 SW: 1000 Seed Weight, OC: Oil Content, OY: Oil Yield, HI: Harvest Index)

3.5. Hierarchical Clustering Analysis

In the dendrogram, LINAS and DİNÇER form a subset among themselves and are separated from other varieties by a higher linkage distance. In the second main group, YEKTA and BALCI merge as the closest variety pair, followed by OLAS; ZİRKON and GÖKTÜRK are included in the same main cluster at higher linkage distances. Increasing linkage height indicates increased multivariate differences between varieties. However, the low silhouette coefficient confirms that the two main groups in the dendrogram are not separated by definite and strong boundaries (Figure 2).

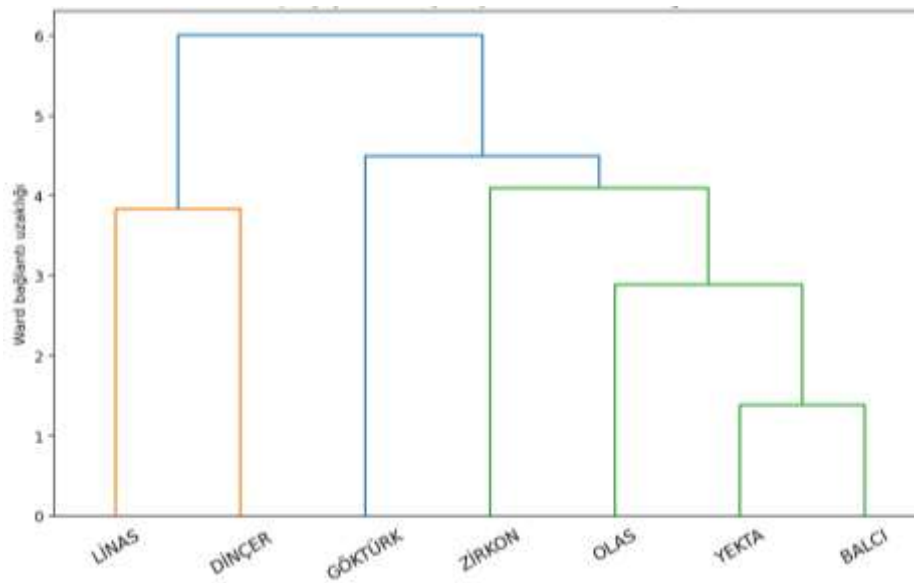


Figure 2. Hierarchical clustering dendrogram of safflower cultivars.

3.6. Path Analysis

The highest positive direct effect on seed yield was determined by 1000 seed weight (0.9218; $p = 0.0065$), followed by main head diameter (0.7985; $p = 0.0064$). In contrast, plant height (-0.7465; $p = 0.0214$) and number of branches (-0.6266; $p = 0.0092$) showed a significant negative direct effect when other variables were kept constant. The direct effects of oil content and harvest index were not statistically significant. The weak simple correlations, while the direct effects were high, indicate the presence of suppression or masking effects between the variables. Although the VIF values remaining in the range of 1.28–2.65 do not indicate a serious multicollinearity problem, the relatively higher values for plant height and 1000 seed weight should be considered in the interpretation of the coefficients (Table 5).

Table 5. Direct and indirect effects on seed yield.

Trait	r	Direct	Indir.	Check	SE	t	p	Sig.	VIF
PH	0.0449	-0.7465	0.7914	0.0449	0.2881	-2.5909	0.0214	*	2.64
NB	-0.2469	-0.6266	0.3797	-0.2469	0.2076	-3.0186	0.0092	**	1.37
MHD	0.2093	0.7985	-0.5892	0.2093	0.2495	3.1999	0.0064	**	1.98
1000 SW	0.2856	0.9218	-0.6362	0.2856	0.2886	3.1935	0.0065	**	2.65
OC	-0.0155	0.3297	-0.3453	-0.0155	0.2124	1.5526	0.1428	ns	1.43
HI	0.2501	0.0535	0.1966	0.2501	0.2007	0.2667	0.7936	ns	1.28

3.7. Discussion

The main components of grain yield in safflower are the number of plants per unit area, the number of fertile heads per plant, the number of seeds per head, and the average seed weight. Studies conducted on genetic material show that the number of heads per plant, the number of seeds per head, and the weight of 100 or 1000 seeds are mostly positively correlated with grain yield. Valli et al. (2016) reported that in 20 safflower genotypes, grain yield per plant showed a positive and significant correlation with the number of seeds per head and the weight of 100 seeds. In the same study, path analysis revealed that the highest direct effect on grain yield was on the weight of 100 seeds, followed by the number of seeds per head. This finding shows that seed size is not only a yield-related trait but can also directly contribute to yield increase in certain genetic materials. Total biomass is the total dry matter produced by the plant during its growth period; the harvest index shows how much of this dry matter is transferred to the economic product, in other words, the grain. High grain yield in safflower is due to the combination of high biological yield and efficient dry matter sharing.

Mokhtassi Bidgoli et al. (2006) evaluated six safflower genotypes for two years and reported that grain yield showed significant correlations with total biomass, stem yield, head diameter, 1000-grain weight, and grain weight per head. Path analysis determined that total biomass, grain weight per head, first fertile branch height, 1000 seed weight, and flowering time had significant direct effects on grain yield. Stepwise regression analysis showed that 94% of the total variation in grain yield could be explained by total biomass and the number of days to branching initiation, demonstrating the importance of resource-generating capacity in safflower.

The relationship between plant height and grain yield varies depending on the environment and genotype. Medium-height plants can carry more leaf area, biomass, and heads; however, excessive height can increase the risk of lodging, delayed maturation, and increased assimilation to vegetative organs. In semi-arid conditions in Türkiye, plant height has been reported to be positively correlated with grain yield and to have a high direct effect on yield (Sirel & Aytaç, 2015).

The relationship between oil content and seed yield in safflower is often complex. While high seed yield may lead to dilution in oil content in some genotypes, in some materials both traits can be increased together. Oil yield, which is the product of grain yield and oil content, should be considered a more holistic trait in terms of economic evaluation.

Topal et al. (2010), in their study conducted under drought conditions, reported that the direct effect of oil yield on seed yield was high; and that the number of seeds per head had a significant indirect effect on oil yield. In the study, it was concluded that oil content, number of seeds per head, and plant height are important selection traits for drought conditions.

4. Conclusion and Recommendations

The traits that most frequently show a positive correlation with grain yield in safflower are the number of heads per plant, number of seeds per head, seed weight per head or plant, 100–1000 seed weight, total biomass, and harvest index. However, the effects of these characteristics vary depending on genotype, cultivation technique, and water regime. In particular, the literature reports different correlations for plant height, number of branches, flowering time, and ripening time, indicating that selection criteria should be determined according to the target environment. In Türkiye semi-arid and terminal drought-risk conditions, selection should be based on a multi-trait index that evaluates head number, number of seeds per head, 1000 seed weight, and harvest index together.

Thanks and Information Note

This study was supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit of Yozgat Bozok University under project code FED-2026-1989.

References

- Açıkgöz, N., İlker, E., Gökçöl, A. 2004. Biyolojik araştırmaların bilgisayarda değerlendirmeleri. Ege Üniversitesi, Tohum Teknolojisi Uygulama ve Araştırma Merkezi, Yayın No:2.
- Afzal, O., Asif, M., Ahmed, M., Awan, F.K., Aslam, M.A., Zahoor, A., Bilall, M., Shaheen, F.A., Zulfiqar, M.A., Ahmed, N. 2017. Integrated nutrient management of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under rainfed conditions. Am. J. Plant Sci. 8 (9): 2208–2218.
- Akgün, İ., Türkay, C. 2025. Bazı yulaf genotiplerinin tohum verimi ve verim öğelerinin belirlenmesi. Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi. 7(1):47-54.
- Ali, N., Javidfar, F., Elmira, J. Y., Mirza, M. Y. 2003. Relationship among yield components and selection criteria for yield improvement in winter rapeseed (*Brassica napus* L.). Pakistan Journal of Botany. 35(2): 167-174.
- Arslan, H., Güler, D. 2022. The effect of different row spacing on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). ISPEC Journal of Agricultural Sciences, 6(2), 294–306.
- Baljani, R., Shekari, F., Sabaghnia, N. 2015. Biplot analysis of trait relations of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes in Iran. Crop Res. 50 (1to3: 63–73.
- Hapsari, R.T., Adie, M.M., Krisnawati, A. 2021. Yield performance and agronomic character association in soybean genotypes. IOPConference Series: Earth and Environmental Science. 911(1).
- Karaca Öner, E., Şeker, T. 2020. Aspir (*Carthamus tinctorius* L.) Çeşitlerinin Kuru Koşullarda Verim ve Verim Performanslarının Belirlenmesi. Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi, 6(2), 296-301.
- Köse, A., Çelikoğlu Koşar, F., Bilir, Ö. 2021. Mutasyon ıslahı ile geliştirilmiş bazı aspir (*Carthamus tinctorius* L.) hatlarının tarımsal performansları. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi. 8(2): 262–273.
- Mokhtassi Bidgoli, A., Akbari, G., Mirhadi, M. J., Zand, E., & Soufizadeh, S. (2006). Path analysis of the relationships between seed yield and some morphological and phenological traits in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Euphytica, 148, 261–268.
- Mousavi Ojaq, S.M., Mozafari, H., Jabbari, H., Sani, B. 2020. Evaluation of yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes under semi-arid conditions, Plant Genetic Res. 18 (4): 270–277.
- Pahlavani, M., Saeidi, G., Mirlohi, A., 2012. Genetic analysis of seed yield and oil content in safflower using F1 and F2 progenies of diallel crosses. International Journal of Plant Production. 1(2):129-140.
- Sirel, Z., & Ayaç, Z. (2015). Relationships between the seed yield and some agronomic characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under semi-arid conditions. Turkish Journal of Field Crops, 21, 29–35.
- Topal, M., Öztürk, E., & Polat, T. (2010). Path analysis of seed yield components using different correlation coefficients in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). The Journal of Animal and Plant Sciences, 20, 220–224.

- Valli, P., Sudhakar, C., Rani, J., Rajeswari, R.R. 2016. Correlation and path coefficient analysis for the yield components of Safflower germplasm (*Carthamus tinctorius* L.). Electronic Journal of Plant Breeding. 7(2):420-426.
- Vosoughkia, M.G., Mehrdad, G., Maryam, S.M., Omid, A.H. 2011. Lipid composition and oxidative stability of oils in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed varieties grown in Iran. Adv. Environ. Biol. 5 (5): 897–890.
- Wang, Q., Zhang, T., Cui, J., Wang, X., Zhou, H., Han, J., Gislum, R. 2011. Path and ridge regression analysis of seed yield and seed yield components of Russian wildrye (*Psathyrostachys juncea* Nevski) under field conditions. PLoS One. 18;6(4):e18245.
- Zeinalzadeh-Tabrizi, H., Kokab, S., Maleki, H.H., Farzamisepehr, M. 2025. Interrelationships among agro-morphological characteristics of Iranian safflower germplasm under cold and rain-fed conditions. Ecological Genetics and Genomics. 35;100354.

THE Q-ANALOGUE OF THE TERRACED RHALY MATRIX

Bahar Kuloğlu

Sivas Science and Technology University,
Department of Engineering Basic Sciences, Sivas, Türkiye
<http://orcid.org/0000-0001-7624-8270>
bkuloglu@sivas.edu.tr or bahar_kuloglu@hotmail.com

Abstract

In this study, a q -analogue of the classical Rhalý terraced matrix is introduced and several of its algebraic and spectral properties are investigated. Explicit expressions for the determinant and inverse matrix are obtained, and a recurrence relation for the corresponding characteristic polynomials is derived. Furthermore, coefficient relations associated with these characteristic polynomials are established. To analyze the spectral structure of the proposed matrix family, several auxiliary lemmas are proved. In particular, it is shown that zero is not an eigenvalue of the q -Rhalý terraced matrix and that consecutive characteristic polynomials do not possess common roots. These properties suggest a behavior similar to that of classical Sturm sequences. However, a detailed analysis reveals that the characteristic polynomial sequence does not satisfy the third Sturm condition. Consequently, although several Sturm-type properties are preserved, the sequence fails to form a genuine Sturm chain. This observation provides an interesting example showing that the validity of common auxiliary conditions does not necessarily imply the Sturm property for characteristic polynomial sequences arising from structured q -analogue matrices. The results contribute to the spectral theory of terraced matrices and highlight certain limitations in extending classical Sturm arguments to q -deformed matrix families.

1. Introduction

Matrix analysis is fundamental in various fields, with the spread—defined as the difference between the largest and smallest eigenvalues—being a key spectral property. Optimizing the spread is crucial for applications such as coding theory and signal processing. Prior studies (Horn and Johnson 2013; Golub and Van Loan 2013) show that smaller matrix dimensions and appropriate scaling parameters improve computational efficiency and spectral quality.

This work focuses on matrices constructed with Fibonacci sequences and scaling parameters. Increasing the matrix size leads to higher upper bounds for the spread, confirming trends noted by Parlett (1998). In (Almasri 2016), Almasri provides a comprehensive study on the conditions under which terraced matrices are absolutely summing, offering valuable insights into their mathematical properties and applications. This paper provides a solid foundation for understanding the significance and applications of terraced matrices in mathematical analysis.

Rhaly terraced matrix sequences (Rhaly 1989) offer opportunities to link them with other well-known integer sequences, such as the Fibonacci sequence. The Rhaly terraced matrices have the form

$$R_a = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ t_2 & t_2 & 0 & 0 & \dots \\ t_3 & t_3 & t_3 & 0 & \dots \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

So, we plan to examine extensions such as the Rhaly terraced Fibonacci matrix

$$R_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 2 & 2 & 2 & 0 & \dots \\ 3 & 3 & 3 & 3 & \dots \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

in which the sums of the rows result in the sequence $\{nF_n\}$, and the sums of the leading diagonals result in the sequence $\{A_n\} = \{1, 1, 3, 5, 10, 16, 29, 45, 75, 115, \dots\}$. These two sequences are respectively A045925 and A000990 of Sloane's *OIES* (Sloane 2024). MacMahon (MacMahon 1924) found the non-zero general terms of $\{A_n\}$ as

$$t_n = \sum_{k=\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor}^n F_{k+1} \quad (1.3)$$

For example,

$$t_5 = F_3 + F_4 + F_5 = 10.$$

Other valuable studies on matrices are the studies carried out by adapting number sequences to matrices. In these studies, circulant matrices were generally considered and many important properties of these matrices, such as their norm properties, characteristic equations, determinants, eigenvalues, and principal minors, were examined (Kuloğlu et al. 2023a, b; Kumari et al. 2023; Kızılateş and Tuğlu 2016, 2018; Prasad et al. 2024).

r –Terraced $R_{r,n}$ matrices, which are a more general form of Terraced matrices, will be created and the general properties of these matrices will be introduced.

Let $r \in \mathbb{C}$ and $t_1 < t_2 < \dots < t_n$. r –Terraced $R_{r,n}$ is represent as follows:

$$R_{r,n} = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ rt_2 & t_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ rt_3 & rt_3 & t_3 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ rt_4 & rt_4 & rt_4 & t_4 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ rt_n & rt_n & rt_n & rt_n & rt_n & \dots & rt_n & t_n \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

and their elements satisfy:

$$R_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{if } j > i \\ t_k, & \text{if } j < i \\ t_k, & i = j \end{cases}$$

2. Main Results

Definition 2. The matrix whose entries are defined as follows:

$$R_n^{(q)} = \begin{cases} 0, & \text{if } j > i \\ [i]_q, & \text{if } i \geq j \end{cases}$$

$$R_n^{(q)} = \begin{bmatrix} [1]_q & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ [2]_q & [2]_q & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ [3]_q & [3]_q & [3]_q & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [n]_q & [n]_q & [n]_q & \cdots & [n]_q & [n]_q \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

is called the q-Rhaly Terraced matrix. If we write this matrix in explicit form, we obtain the following matrix:

$$R_n^{(q)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1+q & 1+q & 0 & \cdots & 0 \\ 1+q+q^2 & 1+q+q^2 & 1+q+q^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1+q+\cdots+q^{n-1} & 1+q+\cdots+q^{n-1} & 1+q+\cdots+q^{n-1} & \cdots & 1+q+\cdots+q^{n-1} \end{bmatrix}.$$

If we take $q = 1$, the q-Rhaly matrix transforms into a Rhaly matrix.

Theorem 3. The determinant of the matrix $R_n^{(q)}$ is given by

$$\det(R_n^{(q)}) = \prod_{i=1}^n [n]_q.$$

Proof. Since matrix $R_n^{(q)}$ is a lower triangular matrix, its determinant is the product of the elements on the main diagonal; therefore,

$$\det(R_n^{(q)}) = [1]_q [2]_q \cdots [n]_q = \prod_{i=1}^n [n]_q$$

is obtained.

Theorem 4. Let the matrix $R_n^{(q)}$ defined as in (2.1). For brevity, we can write this matrix as follows:

$$R_n^{(q)} = \begin{bmatrix} R_{n-1}^{(q)} & B \\ A & [n]_q \end{bmatrix}$$

Where $A = [[n]_q [n]_q \cdots [n]_q]_{1 \times n-1}$ is a row matrix and $B = [0, 0, 0, \dots, 0]$ is an $(n-1) \times 1$ column matrix.

If $R_n^{(q)}$ is nonsingular matrix, then the inverse of $R_n^{(q)}$ is as follows:

$$(R_n^{(q)})^{-1} = \begin{bmatrix} (R_{n-1}^{(q)})^{-1} + x (R_{n-1}^{(q)})^{-1} B A (R_{n-1}^{(q)})^{-1} & -x (R_{n-1}^{(q)})^{-1} B \\ -x A (R_{n-1}^{(q)})^{-1} & x \end{bmatrix}$$

where $x = \frac{1}{[n]_q - A (R_{n-1}^{(q)})^{-1} B}$.

Proof. For the proof, we utilize math induction on n . It is clear that the result is true for $n = 2$, that is

$$R_2^{(q)} = \begin{bmatrix} [1]_q & 0 \\ [2]_q & [2]_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1+q & 1+q \end{bmatrix}$$

$$(R_2^{(q)})^{-1} = \frac{1}{[1]_q [2]_q - 0} \begin{bmatrix} [2]_q & 0 \\ -[2]_q & [1]_q \end{bmatrix} = \frac{1}{(1+q)} \begin{bmatrix} 1+q & 0 \\ -(1+q) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1/1+q \end{bmatrix}$$

Let's assume the equality holds for $n-1$. That is;

$$(R_{n-1}^{(q)})^{-1} \cdot R_{n-1}^{(q)} = I_{n-1}.$$

Now, let's prove the theorem is true for all n using the equation given above.

$$\begin{bmatrix} (R_{n-1}^{(q)})^{-1} & B \\ -xA(R_{n-1}^{(q)})^{-1} & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{n-1}^{(q)} & B \\ A & [n]_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_{n-1}^{(q)})^{-1} R_{n-1}^{(q)} & 0 \\ -xA(R_{n-1}^{(q)})^{-1} R_{n-1}^{(q)} + xA & x[n]_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{n-1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{[n]_q} [n]_q \end{bmatrix}$$

This proof is completed.

Theorem 5. For $n \geq 2$ the characteristic polynomial of the $R_n^{(q)}$ satisfies following equation:

$$\xi_n(\lambda) = ([n]_q - \lambda) \xi_{n-1}(\lambda).$$

Where $\xi_0(\lambda) = 1, \xi_1(\lambda) = 1 - \lambda$.

Proof. Let $\xi_n(\lambda)$ be characteristic polynomials of the q-analogue Rhaly Terraced matrix. Then we have

$$\xi_n(\lambda) = \det(R_n^{(q)} - \lambda I) = \begin{vmatrix} [1]_q - \lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ [2]_q & [2]_q - \lambda & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ [3]_q & [3]_q & [3]_q - \lambda & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [n]_q & [n]_q & [n]_q & \cdots & [n]_q & [n]_q - \lambda \end{vmatrix}$$

Since the determinant has the property of being a lower triangular matrix, it is calculated as follows:

$$\begin{aligned} \xi_n(\lambda) &= \det(R_n^{(q)} - \lambda I) = ([1]_q - \lambda)([2]_q - \lambda) \cdots ([n]_q - \lambda) \\ &= \prod_{i=1}^n ([i]_q - \lambda) = ([n]_q - \lambda) \xi_{n-1}(\lambda). \end{aligned}$$

Theorem 6. Let $\xi_n(\lambda)$ denote the characteristic polynomials of the matrix $R_n^{(q)}$. The coefficients $\gamma_i^{(n)}$ satisfy the following recurrence relation for $1 \leq i \leq n-2$.

$$\xi_n(\lambda) = (-1)^n \lambda^n + (-1)^{n-1} \gamma_{n-1}^{(n)} \lambda^{n-1} + \cdots + (-1) \gamma_1^{(n)} \lambda + \gamma_0^{(n)}$$

Where $\gamma_0^{(n)} = [n]_q \gamma_0^{(n-1)}$ and $\gamma_i^{(n)} = [n]_q \gamma_i^{(n-1)} - \gamma_{i-1}^{(n-1)}$.

Proof. Considering Theorem 5, we have

$$\begin{aligned} &(-1)^n \lambda^n + (-1)^{n-1} \gamma_{n-1}^{(n)} \lambda^{n-1} + \cdots + (-1) \gamma_1^{(n)} \lambda + \gamma_0^{(n)} \\ &= ([n]_q - \lambda) \left((-1)^{n-1} \lambda^{n-1} + (-1)^{n-2} \gamma_{n-2}^{(n-1)} \lambda^{n-2} + \cdots + (-1) \gamma_1^{(n-1)} \lambda + \gamma_0^{(n-1)} \right) \end{aligned}$$

By using the property of equality for coefficients in polynomials, we obtain the following equalities:

$$\begin{aligned} \gamma_0^{(n)} &= [n]_q \gamma_0^{(n-1)} \\ (-1)^{n-1} \gamma_{n-1}^{(n)} &= [n]_q (-1)^{n-1} - (-1)^{n-2} \gamma_{n-2}^{(n-1)} \\ \gamma_{n-1}^{(n)} &= [n]_q + \gamma_{n-2}^{(n-1)} \\ \gamma_{n-2}^{(n)} &= [n]_q \gamma_{n-2}^{(n-1)} - \gamma_{n-3}^{(n-1)}, \dots, \gamma_i^{(n)} = [n]_q \gamma_i^{(n-1)} - \gamma_{i-1}^{(n-1)}. \end{aligned}$$

We next present auxiliary lemmas to be used in applying Sturm's Theorem, which will yield important results on the eigenvalues of the q-Rhaly Terraced matrix.

Lemma 1. Let $\xi_i(\lambda)$ denote the characteristic polynomial $R_n^{(q)}$ for $1 \leq i \leq n$. Then the following hold.

(i) $\xi_i(0) \neq 0$, that is, zero is not eigenvalue of $R_i^{(q)}$.

(ii) The consecutive terms $\xi_i(\lambda), \xi_{i+1}(\lambda)$ can not have a common zero, so, $R_i^{(q)}$ and $R_{i+1}^{(q)}$ have not common eigenvalues.

Proof.

(i) From Theorem 5, if we write 0 instead of λ we get

$$\begin{aligned} \xi_i(0) &= ([n]_q) \xi_{i-1}(0) \\ &= [n]_q [n]_q \xi_{i-2}(0) \\ &= [n]_q [n]_q \cdots [n]_q \neq 0. \end{aligned}$$

Hence, $\xi_i(0) \neq 0$, for $1 \leq i \leq n$. This means that 0 is not the eigenvalue of $R_n^{(q)}$.

(ii) Let's assume that $\xi_i(\lambda)$ and $\xi_{i+1}(\lambda)$ have a common eigenvalue of 0. That is;

$$\begin{aligned} \xi_i(\lambda_k) &= \xi_i(\lambda_{k+1}) = 0, \\ \xi_{i+1}(\lambda_k) &= ([i+1]_q - \lambda_k) \xi_i(\lambda_k) \end{aligned}$$

Equality is ensured. In the next step we get

$$\xi_{i+1}(\lambda_k) = ([i]_q - \lambda_k)\xi_{i-1}(\lambda_k).$$

If we continue like this, we obtain the following equation:

$$\xi_{i-1}(\lambda_k) = \xi_{i-2}(\lambda_k) = \dots = \xi_0(\lambda_k) = 0.$$

From Theorem 5 we know that $\xi_0(0) = 1$. This means that $R_i^{(q)}$ and $R_{i+1}^{(q)}$ do not have a common eigenvalue.

Lemma 2. Let $\xi_i(\lambda)$ denote the characteristic polynomials of the matrix $R_n^{(q)}$ for $1 \leq i \leq n$. Suppose that $S_1, S_2 \subset (0, \infty)$ are arbitrary intervals containing no roots of $\xi_{i-1}(\lambda)$ and $\xi_i(\lambda)$, respectively and $S_3 = (s, \infty)$ be an interval containing no zeros of all $\xi_i(\lambda)$.

Then,

(i) $\frac{\xi_i(\lambda)}{\xi_{i-1}(\lambda)}$ is strictly decreasing on S_1 ,

(ii) $\frac{\lambda \xi_{i-1}(\lambda)}{\xi_i(\lambda)}$ is strictly increasing on S_2 ,

(iii) For $\lambda \in S_3$, $(-1)^{i-2}\xi_i(\lambda) < (-1)^{i-1}\lambda \xi_{i-1}(\lambda)$.

Proof. We will prove (i) and (ii) using a theorem we know from calculus class. That is;

If a function f is differentiable on an interval I and its derivative is negative throughout the entire interval, then the function decreases strictly on that interval. Therefore, for all $j \leq n$ values

$$\xi_{j+1}(\lambda) = ([j+1]_q - \lambda)\xi_j(\lambda)$$

If we divide both sides by $\xi_j(\lambda)$, we get the following equation:

$$\begin{aligned} \frac{\xi_{j+1}(\lambda)}{\xi_j(\lambda)} &= ([j+1]_q - \lambda). \\ \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\xi_{j+1}(\lambda)}{\xi_j(\lambda)} \right) &= -1 < 0 \end{aligned}$$

Therefore, it is obvious that it is strictly decreasing.

(ii) is the opposite of (i) For $j \leq n$, we know that

$$\frac{\xi_j(\lambda)}{\xi_{j+1}(\lambda)} = \frac{1}{([j+1]_q - \lambda)}.$$

Multiplying both sides by λ and using the fundamental theorem of Calculus again, we obtain the following inequality:

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\lambda \xi_j(\lambda)}{\xi_{j+1}(\lambda)} \right) = \frac{[j+1]_q}{([j+1]_q - \lambda)^2} > 0.$$

This shows that it is increasing.

(iii) Since $\xi_i(\lambda) = (-1)^i \lambda^i + (-1)^{i-1} \gamma_{i-1}^{(n)} \lambda^{i-1} + \dots + (-1) \gamma_1^{(n)} \lambda + \gamma_0^{(n)}$

It follows that

$$\begin{aligned} \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{\lambda \xi_{i-1}(\lambda)}{\xi_i(\lambda)} &= \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{\lambda \left((-1)^{i-1} \lambda^{i-1} + (-1)^{i-2} \gamma_{i-2}^{(n)} \lambda^{i-2} + \dots + (-1) \gamma_1^{(n)} \lambda + \gamma_0^{(n)} \right)}{(-1)^i \lambda^i + (-1)^{i-1} \gamma_{i-1}^{(n)} \lambda^{i-1} + \dots + (-1) \gamma_1^{(n)} \lambda + \gamma_0^{(n)}} \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{\left((-1)^{i-1} \lambda^i + (-1)^{i-2} \gamma_{i-2}^{(n)} \lambda^{i-1} + \dots + (-1) \gamma_1^{(n)} \lambda^2 + \lambda \gamma_0^{(n)} \right)}{(-1)^i \lambda^i + (-1)^{i-1} \gamma_{i-1}^{(n)} \lambda^{i-1} + \dots + (-1) \gamma_1^{(n)} \lambda + \gamma_0^{(n)}} \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{(-1)(-1)^i}{(-1)^i} = -1. \end{aligned}$$

If the value of $\lambda \rightarrow \infty$ is -1, then for every finite amount of λ , the value must be greater than the limit. That is to say;

$$\frac{\lambda \xi_{i-1}(\lambda)}{\xi_i(\lambda)} < -1, \text{ for } \lambda \in S_3.$$

Since $\xi_i(\lambda)$ has no root in the interval S_3 , $\xi_i(\lambda)$ does not change sign on S_3 and in particular $\xi_i(\infty)$ has the same sign. Hence for $\lambda \in S_3$, we get

$$(-1)^{i-2}\xi_i(\lambda) > 0$$

So, the sign is $(-1)^i$. Therefore, we can safely bring the inequality into this form by performing multiplication with signs:

$$\begin{aligned}\frac{\lambda \xi_{i-1}(\lambda)}{\xi_j(\lambda)} &< -1 \\ \frac{(-1)^{i-2} \xi_i(\lambda) \lambda \xi_{i-1}(\lambda)}{\xi_j(\lambda)} &< -1 (-1)^{i-2} \xi_i(\lambda) \\ (-1)^{i-2} \lambda \xi_{i-1}(\lambda) &< (-1)^{i-1} \xi_i(\lambda)\end{aligned}$$

If we multiply both sides by -1 we get:

$$(-1)^{-1} \lambda \xi_{i-1}(\lambda) > (-1)^{i-2} \xi_i(\lambda).$$

Theorem 8. The sequence of characteristic polynomials $\xi_0(\lambda) = 1, \xi_1(\lambda), \xi_2(\lambda), \dots, \xi_n(\lambda)$ arising from $R_n^{(q)}$ for $1 \leq i \leq n$, satisfies (Except for (iii)) the Sturm property on interval $(0, \infty)$.

Proof. It is obvious that the characteristic polynomials obtained for matrix q-Rhaly matrix are continuous in the interval $(0, \infty)$. Let us then show that these polynomials, which are continuous from 0 to n , satisfy the Sturm properties:

(i) It is clear that polynomial $\xi_0(\lambda) = 1$ has no roots in the interval $(0, \infty)$.

(ii) Now let's show that the set of zeros of $\xi_i(n)$ for $1 \leq i \leq n$ is disjoint. We can do this by induction using i: we know that $\xi_1(n)$ holds for $i = 1$. It is easily seen that the root of the characteristic equation corresponding to ξ_1 is $\lambda_1 = 1$. Assume the claim hold for all $i \leq j$. We show that it also holds for $j + 1 \leq n$. From Theorem 5, we have

$$\begin{aligned}\xi_{j+1}(\lambda) &= ([j + 1]_q - \lambda) \xi_j(\lambda) \\ \frac{\xi_{j+1}(\lambda)}{\xi_j(\lambda)} &= ([j + 1]_q - \lambda).\end{aligned}$$

Furthermore, from Lemma 1 (ii) and Lemma 2 (i), we know that $\xi_j(\lambda)$ and $\xi_{j+1}(\lambda)$ do not have a common root, and that $\frac{\xi_{j+1}(\lambda)}{\xi_j(\lambda)}$ is strictly decreasing. Therefore, $\xi_{j+1}(\lambda)$ can have at most one root

between two consecutive roots that $\xi_j(\lambda)$ can have. Otherwise, the condition that $\frac{\xi_{j+1}(\lambda)}{\xi_j(\lambda)}$ is strictly decreasing would be contradicted. Consequently, the root of $\xi_j(\lambda)$ and the root of $\xi_{j+1}(\lambda)$ do not coincide in the same interval. This means that Sturm's second property holds for $j + 1 \leq n$.

(iii) For each $1 \leq i \leq n - 1$, we need show that whenever $\xi_i(\lambda_0) = 0$, one has

$$\xi_{i-1}(\lambda_0) \xi_{i+1}(\lambda_0) < 0.$$

From Theorem 5, for $1 \leq i \leq n - 1$, we write

$$\xi_{j+1}(\lambda) = ([j + 1]_q - \lambda) \xi_j(\lambda)$$

It is clearly seen here that inequality is not achieved.

Conclusion

A new q-analogue of the Rhaly terraced matrix has been introduced and its basic matrix-theoretic properties have been examined. Closed-form formulas for the determinant and inverse matrix were obtained, while recurrence relations for the characteristic polynomials and their coefficients were established.

The spectral analysis revealed that several properties commonly associated with Sturm sequences remain valid. In particular, zero was shown not to be an eigenvalue of the matrix, and consecutive characteristic polynomials were proved to have no common roots. These results initially suggest the possibility of a Sturm structure. Nevertheless, the third Sturm condition fails for the characteristic polynomial sequence associated with the q-Rhaly terraced matrix.

Therefore, the proposed matrix family constitutes an instructive example in which several Sturm-type auxiliary properties hold, while the complete Sturm property does not. This demonstrates that the validity of such auxiliary conditions alone is insufficient to guarantee a genuine Sturm sequence. The obtained results provide additional insight into the spectral behavior of q-analogue terraced matrices and may motivate further investigations on alternative criteria for eigenvalue analysis in structured matrix families.

References

- Almasri, I. (2016). Absolutely Summing Terraced Matrices. *Concrete Operators*, 3(1), 1-7.
<https://doi.org/10.1515/conop-2016-0001>
- Akbıyık, S. Y., Akbıyık, M., Yılmaz, F. (2021), One Type of Symmetric Matrix with Harmonic Pell Entries, Its Inversion, Permanents and Some Norms, *Mathematics*, 9 (5):539
- Hoggatt, Verner E., Jr. (1969). *Fibonacci and Lucas Numbers*. Boston, MA: Houghton-Mifflin, Chs.5,7.
- Horn, R. A. (1990), The Hadamard product, *Proc Sympos Appl Math* 40:87-169
- Horn R. A., Johnson C. R. (1991), *Topics in matrix analysis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Horn, R. A., and Charles R. J. (2013). *Matrix Analysis*. 2. baskı, Cambridge University Press.
- Kızılateş, C., & Tuglu, N. (2018). On the Norms of Geometric and Symmetric Geometric Circulant Matrices with the Tribonacci Number. *Gazi University Journal of Science*, 31(2), 555-567.
- Kızılateş, C., Tuglu, N. (2016) On the bounds for the spectral norms of geometric circulant matrices. *J Inequal Appl* 2016, 312. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1255-1>.
- Kumari, M., Prasad, K., Özkan, E., Jagmohan T. (2023) On the Norms and Eigenvalues of r-Circulant Matrices with k-Mersenne and k-Mersenne–Lucas Numbers. *Math Notes* 114, 522–535.
<https://doi.org/10.1134/S0001434623090225>
- Kuloğlu, B., Eser, E., & Özkan, E. (2023). On the Properties of r-Circulant Matrices Involving Generalized Fermat Numbers. *Sakarya University Journal of Science*, 27(5), 956-964.
<https://doi.org/10.16984/sofenbilder.1280572>
- Kuloğlu, B., Eser, E., and Özkan, E., (2023). The r-circulant Matrices Associated with k-Fermat and k-Mersenne Numbers. *Wseas Transactions on Mathematics*, vol.22, 531-543.
- MacMahon, Percy A. (1924). The connexion between the sum of the squares of the divisors and the number of the partitions of a given number. *Messenger of Mathematics*. 54: 113-115.
- Parlett, B. N. (1998). *The Symmetric Eigenvalue Problem*. Classics in Applied Mathematics serisi, SIAM.
- Prasad, K., Kumari, M. and Tanti, J. (2024). On norms, spread, characteristic polynomial and determinant of Hankel and Toeplitz matrices with Mersenne sequence. *Communications in Combinatorics and Optimization*, doi: 10.22049/cco.2024.30037.2287
- Rhaly, H.C. (1989). p-Cesàro matrices. *Houston Journal of Mathematics*. 15(1): 137-146.
- Sloane, N.J.A. (2024). OEIS Foundation Inc., The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences, <http://oeis.org>.
- Shi, B., Kızılateş, C. (2024). A new generalization of the Frank matrix and its some properties. *Comp. Appl. Math.* 43, 19. <https://doi.org/10.1007/s40314-023-02524-2>

**THE EFFECT OF DIFFERENT IBA DOSES AND BACTERIAL APPLICATION ON THE
ROOTING OF CHOKEBERRY HARDWOOD CUTTINGS**

Prof. Dr. Aysen KOÇ

Yozgat Bozok University, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture, Yozgat-Türkiye

Email: aysenk.koc@bozok.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9766-721X>

Zeliha ÖZKAN

Yozgat Bozok University, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture, Yozgat-Türkiye

Email: zelisozkan87@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-9882-4782>

Abstract

Chokeberry (*Aronia melanocarpa*), a berry species native to North America, was first cultivated in Russia in the 1900s and in Eastern European countries in the 1950s. A relatively new species in Turkey, chokeberry, like other berry species, offers high yields per unit area. There is very little information in the literature regarding the propagation of chokeberry using hardwood cuttings. In our study, hardwood cuttings of Viking and Nero chokeberry varieties were taken in December and treated with a commercial biopreparation containing IBA (0-Control, 2000, 4000, 6000 and 8000 ppm) and the bacterial species *Pseudomonas fluorescens*, *Paenibacillus polymyx*, *Bacillus megaterium* and *Pantoea agglomerans*, in single and double combinations, before being planted in a perlite+peat (1:1) medium. In the Nero variety, the highest callus formation rate (25.0%) was obtained from the Bacteria + 4000 ppm IBA application. The highest rooted cutting rate (25.0%) was obtained from the 8000 ppm IBA application. In the Viking variety, the highest callus formation rate (10.0%) was obtained from the 2000 ppm IBA and 8000 ppm IBA applications. The highest rooted cutting rate (40.0%) was obtained from the 6000 ppm IBA application. Although studies indicate that root cuttings are the most common method for propagating aronia, our study also demonstrated the possibility of propagating this species using hardwood cuttings. Propagation by cuttings is widely used because it is easy, economical, and practical. However, since adventitious root formation is low in some species, studies aimed at increasing rooting success have gained importance.

Keywords: Chokeberry, hardwood cutting, hormone, bacteria

1. Introduction

The positive effects on human health have also played a significant role in the increase in the cultivation of berry fruits. Because berry fruits are rich in anthocyanins and phenolic compounds, they are a rich source of antioxidants (Tosun and Yüksel 2003). In addition to their high antioxidant capacity, aronia (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot) contains major polyphenolic compounds and possesses anti-inflammatory, anticancer, antimicrobial, antiviral, antidiabetic, antiatherosclerotic, hypotensive, antiplatelet, and anti-inflammatory properties (Kulling & Rawel, 2008; Borowska & Brzóska, 2016; Szopa et al., 2017).

Native to North America, Aronia—also known as Berry and Black Chokeberry—has been consumed since the mid-20th century. It is classified as Pomae within the Maloideae subfamily of the Rosaceae family (Evans, 1999). The Aronia genus comprises three species: Aronia melanocarpa (Michx.) Elliot (Black), Aronia arbutifolia (L.) Elliot (Red), and Aronia prunifolia (Marsh) (Purple) (Jeppsson, 2000). Aronia melanocarpa, in particular, is a rich source of bioactive compounds with high biological and nutritional value (Chrubasik et al., 2010; Horszwald et al., 2013). It is a good source of vitamins, carotenoids, dietary fiber, minerals, sugars, and organic acids (Kulling and Rawel, 2008). Due to these properties, aronia is referred to as a “superfruit” or “miracle fruit” (Yılmaz et al., 2021).

In aronia cultivation, suitable climate, soil, and other ecological conditions for agricultural production affect both yield and quality. For profitable production, the suitability of the ecological conditions of the area where the orchard will be established, as well as the selection of location and variety, and the implementation of cultural practices such as irrigation and fertilization, are of the utmost importance. In our country’s growing number of new aronia plantations, establishing orchards that adhere to proper fruit-growing techniques is crucial for meeting domestic consumption demand.

In fruit growing, the only way to produce fruit while preserving the superior characteristics of a given variety is through seedling production using vegetative propagation methods. Obtaining standardized produce is a prerequisite for modern cultivation. Standardized production is only possible through vegetative propagation methods. The cutting propagation method is a superior method compared to other vegetative propagation methods due to its ease and practicality. In the method of propagation by cuttings—one of the most common methods of vegetative propagation—a shoot, a root, or a leaf is separated from the parent plant and allowed to root under suitable conditions. Provided it has not undergone any mutations, the new plant formed in this way fully inherits all the characteristics of the parent plant (Kankaya and Özyiğit, 1998). In addition to factors such as the appropriate hormone type and dose, the age and nutritional status of the parent plant from which the cuttings are taken, and the timing of cutting collection, the humidity and temperature conditions of the environment in which the cuttings are placed are also among the key factors influencing success in propagation by cuttings. The objective of this study was to determine the rooting performance of hardwood cuttings from aronia plants—which have a wide range of applications—following the use of indole butyric acid and bacteria, both individually and in combination.

2. Materials and Methods

In this study, hardwood cuttings of Nero and Viking Aronia varieties were used as plant material. The rooting material was tested with a biopreparation containing the auxin group growth regulator Indole-3-butyric acid (IBA, Merck KGaA, Germany) at doses of 2000, 4000, 6000, and 8000 ppm, and in single and double combinations with the bacteria species *Pseudomonas fluorescens*, *Paenibacillus polymyx*, *Bacillus megaterium*, and *Pantoea agglomerans* (Table 1).

Table 1. Single and double combinations of IBA and bacteria applied to hardwood cuttings.

No	Applications
1	Control
2	2000 ppm IBA
3	4000 ppm IBA
4	6000 ppm IBA
5	8000 ppm IBA
6	Bacteria
7	Bacteria + 2000 ppm IBA
8	Bacteria + 4000 ppm IBA
9	Bacteria + 6000 ppm IBA
10	Bacteria + 8000 ppm IBA

The study was conducted with 3 replicates, each containing 10 cuttings. A total of 300 hardwood cuttings were used (10 treatments x 3 replicates x 10 cuttings). The cuttings were kept in the rooting medium for 3 months (12 weeks). A 1:1 mixture of peat and perlite was used as the rooting medium. The cuttings used in the application were planted in a misting unit with bottom heating at a temperature between 18-25°C and a relative humidity of 90-95%.

After the hardwood cuttings planted in the rooting medium were kept in a perlite+peat medium for 3 months (12 weeks), the callus formation rate (%), rooting rate (%), root length (cm), number of roots (pieces/cutting), fresh root weight (g), dry root weight (g), and dry root percentage (%) were determined.

3. Findings and Discussion

This study aimed to determine the rooting performance of hardwood cuttings of two aronia varieties, whose cultivation is increasing day by day due to their high yield per unit area, by using indole butyric acid and bacteria individually and in combination (Table 2).

Among the treatments applied to hardwood cuttings of the Nero variety, the highest callus formation rate was obtained with the Bacteria + 4000 ppm IBA application at 25.0%. In the Viking variety, the highest callus formation rate was found to be 10.0% with the 2000 ppm and 8000 ppm applications.

The rooting rate was highest in the Nero variety with the 8000 ppm IBA application at 25%, while in the Viking variety it was highest with the 6000 ppm IBA application at 40%. Furthermore, in the Viking variety, a rooting rate of 35% was achieved with both the 4000 ppm IBA and Bacteria + 8000 ppm applications (Table 2).

Yıldırım (2023), in his study on rooting aronia with woody cuttings, obtained the highest callus formation rate of 32.25% in the Viking variety. In this study, the highest callus formation rate was obtained from the Aron and Katya varieties. Gümüşbaş (2026), in his study, found that applying different IBA doses to cuttings obtained from 1-year and 2-year-old shoots of five different aronia varieties increased the callus formation rate (except for 3000 ppm IBA in the Galicjanka variety) compared to the control application. The lowest callus formation rate was determined as 13.3% in woody cuttings obtained from 1-year-old shoots of the Galicjanka variety, while the highest callus formation rate was determined as 100% in cuttings obtained from 2-year-old shoots of the Aron and Katya varieties. Among the hormone x variety interactions, the best callus formation rate was obtained with the 1500 ppm IBA dose application at 79%, while the lowest callus formation rate was obtained with the control application at 49.70%. The differences are thought to be due to environmental conditions, the age of the seedlings from which cuttings were taken, the growing medium, and the applied IBA doses.

Table 2. Callus and root formation performance of hardwood cuttings of aronia varieties.

Varieties	Applications	Callus Forming Rate (%)	Cutting Rooted (%)	Cutting Rate
Nero	Kontrol	20,0	0,0	
	2000 ppm	15,0	0,0	
	4000 ppm	10,0	0,0	
	6000 ppm	15,0	5,0	
	8000 ppm	0,0	25,0	
	Bakteri	15,0	0,0	
	Bakteri + 2000 ppm	10,0	0,0	
	Bakteri + 4000 ppm	25,0	0,0	
	Bakteri + 6000 ppm	10,0	0,0	
	Bakteri + 8000 ppm	5,0	0,0	
Viking	Kontrol	5,0	5,0	
	2000 ppm	10,0	15,0	
	4000 ppm	0,0	35,0	
	6000 ppm	0,0	40,0	
	8000 ppm	10,0	10,0	
	Bakteri	0,0	0,0	
	Bakteri + 2000 ppm	0,0	0,0	
	Bakteri + 4000 ppm	5,0	5,0	
	Bakteri + 6000 ppm	0,0	5,0	
	Bakteri + 8000 ppm	0,0	35,0	

In the propagation of berry fruits by cuttings, differences in rooting percentage can be observed between species and varieties (Ercişli and Güleriyüz, 1999; Edizer, 2011; Öz Atasever et al., 2015; Çelik 2016). Brand and Cullina (1992) planted 25 mm long microcuttings of *A. arbutifolia* and *A. melanocarpa* aronia species in a mixture of moistened sphagnum moss and perlite (3:1) under non-sterile conditions. After six weeks, they reported an ex vitro rooting rate of 96% for *A. arbutifolia* and 95% for *A. melanocarpa*. Çelik (2007) investigated the effect of different media on the rooting of green cuttings of tall shrub blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) of northern Northland origin in his study. After applying 1000 ppm to the cuttings, they were planted in rooting media consisting of K+T, K+P, T+P, and K+T+P mixed in equal proportions with sand (K), peat (T), and perlite (P). In the experiment conducted in 2004-2005, the highest rooting rates were reported to have been obtained from the T+P medium, with rates of 92.22% and 97.78%, respectively. In Ekizoğlu's (2010) study investigating the effects of cutting time and IBA dose on rooting of cuttings taken from black mulberry (*Morus nigra* L.) and white mulberry (*Morus alba* L.), cuttings were taken in March, July, and November, and IBA doses of 2000, 4000, and 6000 ppm were applied. In black mulberries, the highest rooting rate was observed in November with 2000 ppm IBA application, while the best rooting degree was found in March with 4000 ppm IBA application. In white mulberries, the highest rooting success and best rooting degree were observed in July with 6000 ppm IBA application. The study showed that a 6000 ppm IBA dose in July resulted in high rooting success in white mulberry cuttings, while a 2000 ppm IBA dose in November resulted in high rooting success in black mulberry cuttings. Yıldırım (2023), in his study on rooting aronia cuttings, obtained the highest rooting rate of 41.95% from the Viking variety. The differences between the results we obtained from this literature, which is consistent with our study, can be explained by differences in climate and dosage. Gümüşbaş (2026) increased the rooting rate (except for Viking and Galicjanka varieties) compared to the control application when he applied different IBA doses to cuttings obtained from 1-year and 2-year shoots of five different aronia varieties. The lowest

rooting rate was obtained from the control application (0.0%) with cuttings obtained from 1-year shoots of Nero and Aron varieties and from the 1500 ppm and 3000 ppm doses (0.0%) with cuttings obtained from 1-year shoots of the Galicjanka variety. The highest rooting rate was obtained from the 3000 ppm dose of the Nero variety with 100%. Among the hormone x variety interactions, the lowest rooting rate was obtained from the control application with 42%, while the highest rooting rate was obtained from the 1500 ppm IBA application with 58.7%. According to Koyuncu et al. (2004), the rooting success of cuttings is affected by many factors such as the time of taking the cutting, the type of cutting, the rooting medium, and environmental conditions. In the propagation of berry fruits by cuttings, differences in rooting percentage can be observed between species and varieties (Ercişli and Güleriyüz, 1999; Edizer, 2011; Öz Atasever et al., 2015; Çelik, 2016).

In rooted cuttings, the number of roots (pieces), root length (cm), fresh and dry root weight (g), and dry root percentage (%) were determined (Table 3).

In the Nero variety, the number of roots was determined to be 3.0 ± 0.0 in the 6000 ppm IBA application and 3.3 ± 0.5 in the 8000 ppm IBA application. In the Viking variety, the lowest number of roots was 2.0 ± 0.0 in the control application, while the highest number was 4.8 ± 0.9 in the 6000 ppm IBA application. Korkut et al. (2017), in their study on blackberry using different rooting media and 3 different applications, reported that they found the highest results in terms of root number in the 500 ppm IBA application. Yıldırım (2023), in his study on rooting aronia with woody cuttings, obtained the highest root number with 0.91 from the Viking variety. Gümüşbaş (2026) reported that the lowest number of roots was obtained from cuttings taken from 1-year-old shoots of Nero, Aron, and Galicjanka varieties, with no roots formed from the control treatment (0.00), while the highest number of roots was obtained from woody cuttings taken from 2-year-old cuttings of the Aron variety with an average of 3.6 roots from the 3000 ppm IBA treatment. In the variety x dose interactions, the lowest number of roots was obtained from the control treatment with an average of 0.70 roots, while the highest number of roots was obtained from the 3000 ppm IBA dose with an average of 1.53 roots.

In the Nero variety, root length was determined to be 1.9 ± 0.8 cm with 6000 ppm IBA application and 3.6 ± 0.7 cm with 8000 ppm IBA application. In the Viking variety, the lowest root length was 1.2 ± 0.1 cm in the control application, while the highest was measured as 7.1 ± 3.3 cm with Bacteria + 8000 ppm IBA application. Yıldırım (2023), in his study on rooting aronia with woody cuttings, obtained the highest root length of 0.96 mm from the Viking variety. Gümüşbaş (2026) found the lowest root length (0.00) in cuttings obtained from 1-year-old shoots of Nero and Aron varieties in the control application, while the highest root length was found in cuttings obtained from 2-year-old shoots of the Katya variety with an average of 7.2 cm in the 1500 ppm IBA application. When the variety x dose interaction was examined, the shortest root length was obtained from the control application with an average of 2.40 cm, and the longest root length was obtained from the 1500 ppm IBA application with 3.84 cm.

Table 3. Root performance of woody cuttings of aronia varieties.

Varieties	Applications	Number of Roots (pieces)	Root Length (cm)	Fresh Root Weight (g)	Dry Root Weight (g)	Dry Root Rate (%)
Nero	Kontrol	0		-	-	-
	2000 ppm	0		-	-	-
	4000 ppm	0		-	-	-
	6000 ppm	3,0±0,0	1.9±0.8	0,191	0,045	23,64
	8000 ppm	3,3±0,5	3.6±0.7	0,688	0,133	19,34
	Bakteri	0		-	-	-
	Bakteri + 2000 ppm	0		-	-	-
	Bakteri + 4000 ppm	0		-	-	-
	Bakteri + 6000 ppm	0		-	-	-
	Bakteri + 8000 ppm	0		-	-	-
Viking	Kontrol	2,0±0,0	1.2±0.1	0,062	0,033	52,72
	2000 ppm	2,7±1,2	3.9±0.4	0,974	0,274	28,07
	4000 ppm	4,3±1,2	5.5±1.5	4,019	1,149	28,59
	6000 ppm	4,8±0,9	5.3±1.8	2,927	0,845	28,86
	8000 ppm	3,0±0,0	3.6±1.1	0,888	0,262	29,54
	Bakteri	0	-	-	-	-
	Bakteri + 2000 ppm	0	-	-	-	-
	Bakteri + 4000 ppm	4,0±0,0	3.3±0.9	0,282	0,078	27,57
	Bakteri + 6000 ppm	4,0±0,0	3.7±2.2	0,672	0,208	31,02
	Bakteri + 8000 ppm	2,2±1,3	7.1±3.3	1,614	0,475	29,40

Fresh root weight was determined to be 0.191 g in the Nero variety with 6000 ppm IBA application and 0.688 g with 8000 ppm IBA application. In the Viking variety, the lowest fresh root weight was 0.062 g per unit in the control application, while the highest was 4.019 g with 4000 ppm IBA application. Dry root weight was determined to be 0.045 g in the Nero variety with 6000 ppm IBA application and 0.133 g with 8000 ppm IBA application. In the Viking variety, the lowest fresh root weight was 0.033 g per unit in the control application, while the highest was 1.149 g with 4000 ppm IBA application. Coşkun et al. (2025) reported that different IBA doses positively affected the fresh and dry weight of roots in aronia microcuttings rooted ex vitro. The researchers stated that root biomass increased at optimum IBA doses, but the increase was limited at high doses.

Dry root percentage is an important seedling quality criterion indicating the balance between the water content and dry matter accumulation in the root tissue. An increase in this parameter indicates that more carbohydrates, cell wall components, and other structural substances are accumulated in the roots, thus forming a more robust and higher-quality root system. Conversely, a low dry root percentage may indicate that although the water content in the roots is high, dry matter accumulation is limited. Dry root percentage was calculated as a percentage by dividing the dry root weight by the fresh root weight. In the Nero variety, it was determined to be 23.64% with the 6000 ppm IBA application and 19.34% with the 8000 ppm IBA application. In the Viking variety, the highest dry root percentage was 52.72% in the control application, while the lowest was calculated as 27.57% in the Bacteria + 4000 ppm IBA application.

4. Conclusion and Recommendations

The increasing consumption of aronia berries, due to numerous scientific studies demonstrating their beneficial effects on human health, has led to a rise in demand for aronia cultivation. This increase has also brought about a need for aronia seedlings. In this study, woody cuttings of Nero and Viking aronia varieties were treated with a commercial biopreparation containing IBA (0 – Control, 2000, 4000, 6000 and 8000 ppm) and the bacterial species *Pseudomonas fluorescens*, *Paenibacillus polymyx*, *Bacillus megaterium* and *Pantoea agglomerans* in single and double combinations, then planted in perlite+peat (1:1) medium and rooting parameters were examined.

In conclusion; In the Nero variety, the highest callus formation rate (25.0%) was obtained from the Bacteria + 4000 ppm IBA application, while the highest rooting rate (25.0%) was achieved with the 8000 ppm IBA application. In the Viking variety, the highest callus formation was obtained with the 2000 ppm IBA and 8000 ppm IBA applications (10.0%). The highest rooted cutting rate was obtained with the 6000 ppm IBA application (40.0%). The highest number of roots was counted in the Nero variety with the 8000 ppm IBA application (3.3 ± 0.5 roots), while in the Viking variety with the 6000 ppm IBA application (4.8 ± 0.9 roots). Root length was measured as 3.6 ± 0.7 cm in the Nero variety with the 8000 ppm IBA application, and 7.1 ± 3.3 cm in the Viking variety with the Bacteria + 8000 ppm IBA application (highest). Fresh root weight was measured as 0.688 g in the Nero variety with 8000 ppm IBA application, and as 4.019 g in the Viking variety with the highest 4000 ppm IBA application. Dry root weight was 0.133 g in the Nero variety with 8000 ppm IBA application, while it was 1.149 g in the Viking variety with the highest 4000 ppm IBA application. The dry root percentage was calculated as 23.64% in the Nero variety with 6000 ppm IBA application, while it was 52.72% in the Viking variety with the highest control application.

The reasons for the different results obtained in these studies are thought to be due to differences in variety and hormone dose, the age and nutritional status of the parent plant from which the cuttings were taken, or the humidity and temperature conditions of the environment in which the cuttings were placed. It can be recommended that different cutting varieties and different doses of growth regulators depending on the variety may be more appropriate in studies to be conducted with this species.

Thanks and Information Note

Yozgat Bozok Üniversitesi Proje Koordinasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi (BAP)'ne FLO-2025-1823 no'lu projemize verdiği maddi destek için teşekkür ederiz.

References

- Borowska, S., & Brzóska, MM. (2016). Chokeberries (*Aronia melanocarpa*) and Their Products as a Possible Means for the Prevention and Treatment of Noncommunicable Diseases and Unfavorable Health Effects Due to Exposure to Xenobiotics. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2016 Nov;15(6):982-1017. doi: 10.1111/1541-4337.12221. Epub 2016 Aug 2. PMID: 33401828.
- Brand, M. H. & Cullina, W. G. (1992). Micropropagation of Red and Black Chokeberry (*Aronia* spp.). *HortScience*, 27(1), 81–81. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.27.1.81>
- Chrubasic, C., Li, G., & Chrubasik, S. (2010). The clinical effectiveness of chokeberry: A systematic review. *Phytother Res.*, 24(8), 1107-1114 <http://eksfan.or.kr/journal/article.php?code=41569>
- Coşkun, S., Dumanoğlu, H., Sarıkamış, G., Delialioğlu, R.A., Kocabaş, Z. (2026). Improvement of Ex vitro Rooting and Acclimatization to Increase Micropropagation Efficiency of Aronia (*Aronia mitschurinii*). *Journal of Agricultural Sciences (Tarım Bilimleri Dergisi)*, 32(1):81-92. DOI: 10.15832/ankutbd.1661934.
- Çelik, H. (2007). Northland kuzey orijinli yüksek çalı maviyemiş (*Vaccinium corymbosum* L.) yeşil çeliklerinin köklenmesi üzerine farklı ortamların etkisi. V. *Ulusal Bahçe Bitkileri Kongresi*, 4-7 Eylül, Erzurum, Cilt 1: Meyvecilik, 37-41p.
- Çelik, H. (2016). Yüksek boylu maviyemiş (*Vaccinium corymbosum* L.) çeşitlerinden alınan yapraklı yumuşak odun mikro çeliklerde köklenme üzerine ortamların Etkisi. *Ulusal Bahçe Bitkileri Kongresi*, 45(1), 1-7. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bahce/issue/57740/1794575>

- Çelik, H., & Şenyaşa, F. (2020). Turnayemisi (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) odun çeliklerinde köklenme ve kök gelişimi üzerine dışsal IBA uygulaması ile çelikteki yayılmasının etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 35(3), 301-308. <https://dergipark.org.tr/en/pub/omuanajas/article/691294>
- Edizer, A. S. (2011). Jumbo böğürtlen (*Rubus fruticosus* L.) çeşidinde vejetatif çoğaltma potansiyelinin belirlenmesi. (Yüksek Lisan Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat).
- Ekizoğlu, C. (2010). Beyazdut (*Morus alba* L.) ve karadutun (*Morus nigra* L.) çelikle çoğaltılması üzerine bir araştırma. (Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu).
- Ercişli, S., & Güler, M. (1999). Bazı kuşburnu (*Rosa* Spp.) tiplerini odun çelikleri ile çoğaltma imkanı üzerine bir araştırma. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 23:305-310. <https://agrifoodscience.com/index.php/TURJAF/article/view/7755>
- Evans, R.C. (1999). Molecular morphological and ontogenetic evaluation of relationships and evolution in the Rosaceae. (PhD, Philosophy Graduate Department, Botany, University of Toronto, Canada).
- Gümüşbaş, M. (2026). Bazı Aronya Çeşitlerinde Odun Çeliği İle Köklenme Düzeylerinin Belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir).
- Horszwald, A., Julien, H., & Andlauer, W. (2013). Characterisation of aronia powders obtained by different drying processes. *Food Chemistry*, 141, 2858-2863. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.103>
- Jeppsson, N. (2000). The effects of fertilizer rate on vegetative growth, yield and fruit quality, with special respect to pigments, in black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) cv. 'Viking'. *Scientia Horticulturae* 127-137s. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bahce/issue/94814/1790595.xml>
- Kankaya, A., & Özyiğit, S. (1998). Bazı klon anaçlarının çelikle çoğaltılabilirliği. I. Ege Bölgesi Tarım Kongresi. 7-11 Eylül 1998. Aydın
- Korkut, E., Türemiş, N., Burğut, A., Büyükyel, Ş., & Cömertpay, M. (2017). Chester Thornless böğürtlen çeşidinin çelikle çoğaltılması üzerine hormon ve bakteri uygulamalarının ve farklı topraksız kültür ortamlarının etkileri. *Bahçe*, 46(1), 311-317. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bahce/issue/94830/1792814>
- Koyuncu, F., Emel, V., & Çelik, M. (2004). Karadut (*Morus nigra* L) çeliklerinin köklenmesi üzerine araştırmalar. Ulusal Kivi ve Üzümsü Meyveler Sempozyumu, 23-25 Ekim, Ordu.
- Kulling, S. E., & Rawel, H. M. (2008). Chokeberry (*Aronia melanocarpa*)—A review on the characteristic components and potential health effects. *Planta medica*, 74(13), 1625-1634. <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/html/10.1055/s-0028-1088306>
- Öz Atasever., Gerçekcioğlu, R., & Yüksek, M. (2015). Tokat 2'siyah frenk üzümü (*Ribes nigrum*) çeşidinin yıllık ve iki yıllık çeliklerle çoğaltılması. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 8(2), 28-31. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/413296>
- Szopa, A., Kokotkiewicz, A., Kubica, P., Banaszcak, P., Wojtanowska-Krośniak, A., Krośniak, M., Marzec-Wróblewska, U., Badura, A., Zagrodzki, P., Bucinski, A., Luczkiewicz, M., & Ekiert, H. (2017). Comparative analysis of different groups of phenolic compounds in fruit and leaf extracts of *Aronia* sp.: *A. melanocarpa*, *A. arbutifolia*, and *A. ×prunifolia* and their antioxidant activities. *Eur Food Res Technol* 243, 1645–1657. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2872-8>.
- Tosun, İ., & Yüksel, S. (2003). Üzümsü Meyvelerin Antioksidan Kapasitesi. *Gıda*, 28(3). <https://izlik.org/JA32DZ83DP>
- Yıldırım, M. (2023). Aronya (*Aronia melanocarpa* L) odun çeliklerinin köklendirilmesi üzerine hormon dozlarının etkileri. (Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat).
- Yılmaz, A., Güler, E., Soydemir, H. E., Demirel, S., Mollahaliloğlu, S., Çiftçi, V., & Karadeniz, T. (2021). Miracle plant: Black chokeberry (*Aronia melanocarpa*). *MAS Journal of Applied Sciences*, 6(1), 83-94. <https://www.masjaps.com/index.php/mas/article/view/13/9>

**THE EFFECT OF DIFFERENT IBA DOSES AND BACTERIAL APPLICATION ON THE
ROOTING OF BLACK MULBERRY HARDWOOD CUTTINGS**

Prof. Dr. Aysen KOÇ

Yozgat Bozok University, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture, Yozgat-Türkiye

Email: aysenk.koc@bozok.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9766-721X>

Sebahat YETER

Yozgat Bozok University, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture, Yozgat-Türkiye

Email: sebahat.yeter@tarimorman.gov.tr

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-4033-1268>

Abstract

Black mulberry (*Morus nigra*) is cultivated in every region of Turkey where fruit cultivation takes place, as it is the homeland and natural distribution area of the mulberry tree. Among vegetative propagation methods, propagation by cuttings is the most commonly used method for mulberry. In studies on this subject, IBA concentrations of 4000–8000 ppm have generally been used. It is known that some bacterial species, which increase root development and regulate plant growth, have positive effects on rooting. In our study, the propagation of three promising black mulberry genotypes selected from Yozgat province using single and double combinations of IBA (2000, 4000, 6000 and 8000 ppm) and bacterial applications was attempted for the first time. In the MSB01 genotype, the highest callus formation rate (30.0%) was obtained from the 6000 ppm IBA application and the Bacteria + 4000 ppm and Bacteria + 6000 ppm IBA applications. In this genotype, the highest rooted cutting rate (33.3%) was obtained only from the 6000 ppm IBA application. In the MSB03 genotype, the highest callus-forming cutting rate (33.3%) and the highest rooted cutting rate (16.7%) were obtained from the Bacteria + 4000 ppm IBA application. In the ÇKR04 genotype, the highest callus-forming cutting rate (20.0%) was obtained from the Bacteria + 8000 ppm IBA application, while the highest rooted cutting rate (10.0%) was obtained from the 8000 ppm IBA application. Propagation by cuttings varies depending on the timing of cutting collection, species and varieties, ecological conditions of the region where the parent plant is grown, and the type of cutting. For these reasons, these factors should be considered when researching the propagation of a species by cuttings.

Keywords: Mulberry, genotype, hardwood cutting, hormone, bacteria

1. Introduction

The mulberry is a fruit species whose fruit and leaves are used in various ways. In our country, mulberry leaves are used in cooking (stuffed grape leaves) in spring and early summer, while in autumn, the fallen leaves are collected and used as animal feed. Mulberry fruit is consumed fresh and dried, and products such as molasses, jam, fruit leather, mulberry paste, ice cream, walnut sausage, vinegar, and fruit juice concentrate are also obtained from it. Mulberry fruit is consumed in different forms in different regions of our country. In some regions, black mulberries are consumed fresh, processed into jam, syrup, or juice; while in other regions, they are used to add color, taste, and aroma to cakes and ice cream. In other countries, the fruits are consumed fresh and dried, and are also used in the making of bread, pastries, pies, puddings, mulberry wine, and ice cream (Lale and Özçağiran 1996, Machii et al. 2002, Martin et al. 2002). In addition to the mulberry fruit, mulberry leaves are used to feed silkworms (Ryu, 1977). Syrup made from black mulberries is also used in modern medicine. Black mulberry syrup is used as a gargle to treat mouth and throat ailments, particularly thrush in infants. Black mulberry roots and bark are known for their laxative and anthelmintic properties. Black mulberry leaves are used for their mild hypoglycemic effect (Asımgil, 1997). It has been reported that anthocyanins found in berry-like fruits and red-colored fruits exhibit protective and therapeutic properties against cancers of the digestive system, such as those of the mouth, larynx, esophagus, stomach, and colon (Prior et al., 1998; Göktepe and Akın, 2024).

Interest in black mulberries—whose range of uses is expanding and whose nutritional value is becoming better understood every day—is steadily increasing. This interest is driving up demand for black mulberry saplings, and saplings of this fruit variety can be sold at high prices. However, due to certain practical challenges in black mulberry sapling production, this demand cannot be fully met. In fruit cultivation, the only way to produce plants while preserving the superior characteristics of a given variety is through seedling production using vegetative propagation methods. Obtaining standardized products is a prerequisite for modern cultivation. Standardized production is only possible through vegetative propagation methods. The cuttings propagation method has advantages over other vegetative propagation methods due to its ease and practicality. For this reason, seedling production for many species and varieties that can be propagated by cuttings is achieved directly through this method. On the other hand, the desired level of success cannot be achieved through stem cuttings in all fruit species. While cuttings root easily in some species, in others, adventitious root formation remains at low levels or does not occur at all.

Due to the practical importance of propagation by cuttings, numerous studies have been conducted—and continue to be conducted—to improve rooting performance in fruit species that are difficult to propagate by cuttings. Black mulberry is one such fruit species. In the vast majority of studies aimed at increasing the rooting percentage in this species, the focus has been on the appropriate type and dose of hormones, as well as the optimal timing for taking cuttings. Although studies have reported varying results regarding rooting success, it cannot generally be said that the rooting percentage is sufficient (Ünal et al. 1992; Özkan and Arslan 1996; Yıldız and Koyuncu 2000; Şenel 2002; Koyuncu et al. 2003). In addition to factors such as the appropriate type and dose of hormone, the age and nutritional status of the parent plant from which the cuttings are taken, and the timing of cutting collection, the humidity and temperature conditions of the environment in which the cuttings are placed are also among the important factors affecting success in propagation by cuttings.

The aim of our study was to determine the rooting performance of black mulberry cuttings—which have a wide range of applications—resulting from the use of indole butyric acid and bacteria, both individually and in combination.

2. Materials and Methods

In this study, wood cuttings from three promising black mulberry genotypes (66MSB01, 66MSB03, and 66ÇKR04) selected from Musabeyli and Çekerek in Yozgat were used as plant material (Aydoğmuş, 2025; Figure 1).



Figure 1. Photos of the 66MSB01, 66MSB03, and 66ÇKR04 genotypes

The study was conducted at the Faculty of Agriculture's tissue culture greenhouse on the Erdoğan Akdağ East Campus of Bozok Yozgat University. The rooting material was tested with a biopreparation containing the auxin group growth regulator Indole-3-butyric acid (IBA, Merck KGaA, Germany) at doses of 2000, 4000, 6000, and 8000 ppm, and in single and double combinations with the bacteria species *Pseudomonas fluorescens*, *Paenibacillus polymyx*, *Bacillus megaterium*, and *Pantoea agglomerans* (Table 1).

Table 1. Single and double combinations of IBA and bacteria applied to hardwood cuttings.

No	Applications
1	Control
2	2000 ppm IBA
3	4000 ppm IBA
4	6000 ppm IBA
5	8000 ppm IBA
6	Bacteria
7	Bacteria + 2000 ppm IBA
8	Bacteria + 4000 ppm IBA
9	Bacteria + 6000 ppm IBA
10	Bacteria + 8000 ppm IBA

The study was conducted in 3 replicates, with 10 cuttings per replicate. A total of 10 applications × 3 replicates × 10 cuttings = 300 wood cuttings were used. The cuttings were kept for 3 months (12 weeks) in a rooting medium consisting of a 1:1 mixture of peat and perlite.

The cuttings were dipped in an IBA solution prepared at concentrations of 2,000, 4,000, 6,000, and 8,000 ppm for 5 seconds before planting. (Figure 2).



Figure 2. The Preparation of the IBA

A 500 ml bacterial solution containing four different types of microorganisms was mixed with 5 liters of sterile water and 250 g of granulated sugar until homogeneous, and then added to the mixture. The steel samples were left to stand in the prepared bacterial solution for 6 hours (Figure 3).



Figure 3. Preparation and Application of the Bacterial Solution

The steel samples to be treated with the Bacteria + IBA method were soaked in a bacterial solution for 6 hours, then dipped into IBA solutions of different concentrations for 5 seconds before being embedded (Figure 4).



Figure 4. Planting hardwood cuttings in the rooting medium

Wood cuttings planted in the rooting medium were kept in a perlite-peat mixture for 3 months (12 weeks), after which the callus formation rate (%), rooting rate (%), root length (cm), number of roots (per cutting), fresh root weight (g), dry root weight (g), and dry root percentage (%) were determined.

3. Findings and Discussion

Hardwood cuttings planted in the rooting medium were kept in a perlite-peat mixture for 3 months (12 weeks), after which the callus formation rate, rooting rate, root length, number of roots, and fresh root weight were determined (Table 2 and Table 3).

In the 66MSB01 genotype, the highest callus formation rate (30.0%) was achieved with a 6000 ppm IBA treatment, compared to the “Bacteria + 4000 ppm” and “Bacteria + 6000 ppm IBA” treatments. The highest percentage of rooted cuttings (33.3%) in this genotype, however, was obtained only from the 6000 ppm IBA treatment. In the 66MSB03 genotype, the highest percentage of callus-forming cuttings (33.3%) and the highest percentage of rooted cuttings (16.7%) were obtained from the Bacteria + 4000 ppm IBA treatment. In the 66ÇKR04 genotype, the highest callus-forming cutting rate (20.0%) was obtained from the Bacteria + 8000 ppm IBA treatment, while the highest rooted cutting rate (10.0%) was obtained from the 8000 ppm IBA treatment (Table 2).

Table 2. Callus and rooting rates (%) of wood cuttings from black mulberry genotypes

Genotypes	Applications	Callus Cutting Rate (%)	Forming Rooted Rate (%)	Cutting
66MSB01	Control	6.7	3.3	
	2000 ppm IBA	10	20	
	4000 ppm IBA	20	20	
	6000 ppm IBA	30	33.3	
	8000 ppm IBA	16.7	16.7	
	Bacteria	20	10	
	Bacteria + 2000 ppm IBA	20	16.7	
	Bacteria + 4000 ppm IBA	30	10	
	Bacteria + 6000 ppm IBA	30	16.7	
	Bacteria + 8000 ppm IBA	13.3	16.7	
66MSB03	Control	10	3.3	
	2000 ppm IBA	20	6.7	
	4000 ppm IBA	16.7	6.7	
	6000 ppm IBA	13.3	3.3	
	8000 ppm IBA	6.7	3.3	
	Bacteria	10	3.3	
	Bacteria + 2000 ppm IBA	10	3.3	
	Bacteria + 4000 ppm IBA	33.3	33.7	
	Bacteria + 6000 ppm IBA	16.7	6.7	
	Bacteria + 8000 ppm IBA	26.7	3.3	
66ÇKR04	Control	16.7	3.3	
	2000 ppm IBA	16.7	6.7	
	4000 ppm IBA	13.3	3.3	
	6000 ppm IBA	10	3.3	
	8000 ppm IBA	10	10	
	Bacteria	16.7	3.3	
	Bacteria + 2000 ppm IBA	13.3	0.0	
	Bacteria + 4000 ppm IBA	10	0.0	
	Bacteria + 6000 ppm IBA	13.3	0.0	
	Bacteria + 8000 ppm IBA	20	6.7	

In cuttings that are difficult to root, rooting is accelerated and the root system is strengthened by applying growth regulators (Kumlay and Eryiğit, 2011). In studies conducted on black mulberry hardwood cuttings, local black mulberry trees were used because there is no registered variety yet. In the studies, it was observed that rooting success increased, especially as the IBA dose increased. Ünal et al. (1992), in their research on the rooting status of black mulberry and purple mulberry hardwood cuttings at 2500 ppm and 5000 ppm IBA concentrations, determined that the rooting rates of black mulberry and purple mulberry hardwood cuttings were 12.90% and 7.50% on average, respectively. IBA application generally increased the rooting rate in both varieties, and this increase was parallel to the hormone concentration. In a study conducted on white mulberry, 10-100 ppm IAA, IBA, and NAA were applied as growth regulators, and it was stated that the applications stimulated callus and root formation under all conditions. It was also reported that these substances promoted rooting even in months when rooting does not normally occur (Şenel, 2002; Yıldız ve Koyuncu (1999). In their research on the rooting of black mulberry hardwood cuttings, they used hormone concentrations of 5000 ppm IBA, 7500 ppm IBA, 5000 ppm NAA, and 7500 ppm NAA in November during the first year of the experiment, and 5000 ppm IBA and 7500 ppm IBA in the second year. In the first year of the experiment, using a rooting medium without bottom heating, the highest rooting rate was obtained with 7500 ppm IBA at 60.40%, while generally low rooting percentages were obtained with the other applications. In

the bottom-heated medium, the highest rooting rate was obtained with the 5000 ppm IBA application at 89.30%. In a study conducted in Isparta, the effects of cutting time, planting method, and rooting medium on the rooting rate and root quality of black mulberry and white mulberry cuttings were investigated. A hormone dose of 5000 ppm IBA was used. The average rooting rate in black mulberry cuttings ranged from 2.22% to 71%, while in white mulberry cuttings it ranged from 3.33% to 50%. The best rooting was obtained in cuttings treated with 5000 ppm. (Şenel, 2002). In a study on the rooting of black mulberry cuttings, the effects of different concentrations of IBA, NAA, and BA on the rooting of black mulberry hardwood and softwood cuttings were investigated. Rooting was carried out in a plastic greenhouse with bottom heating and misting units, and in a perlite medium under outdoor conditions. The highest rooting rate in black mulberry hardwood cuttings was obtained with the 5000 ppm IBA application, at 33.30%. The highest callus formation rate was found to be 70% with the 4000 ppm IBA application. The percentage of live cuttings varied between 56.7% and 80.0%. In cuttings in a perlite medium without bottom heating under outdoor conditions, no rooting was observed. No rooting was obtained in any of the softwood cuttings

taken in July (Koyuncu et al., 2003). In their research on the propagation of white mulberry and black mulberry by cuttings, Karadeniz and Şişman (2003) rooted cuttings in a bottom-heated pumice medium using three different IBA hormone concentrations: 1000 ppm, 2000 ppm, and 4000 ppm. The study reported that hormone treatment of black mulberry cuttings positively affected rooting, with concentrations of 2000 ppm (23.35%) and 4000 ppm (21.65%) yielding higher rooting rates compared to both the control (10%) and 1000 ppm (5%). For White mulberry, it was reported that a 1000 ppm IBA concentration level would be sufficient for good rooting. Erdoğan et al. (2006), in their research on the rooting of mulberry cuttings, examined the effects of different concentrations of IBA on rooting. The study used 10 mulberry types, two black mulberry and eight white mulberry, and two different hormone concentrations of 3500 and 4500 ppm. According to the research results, the best values were obtained from the 3500 ppm and 4500 ppm IBA applications compared to the control. Considering the overall average of all types, the average rooting rate was 13.00% in the control, while this rate was 33.50% in the 3500 ppm IBA application and 41.60% in the 4500 ppm IBA application. In the study conducted by Erdoğan and Aygün (2006) on the propagation of black mulberry with softwood cuttings, three different IBA doses of 4000 ppm, 6000 ppm, and 8000 ppm were used.

The study reported that IBA application increased the rooting rate by 14.20% compared to the control. It was recommended to use a dose of 6000 ppm when a high rooting percentage is desired, and 8000 ppm when high root quality is desired. Polat (2008), in a two-year rooting study conducted in Antakya, examined the effects of different doses of IBA on rooting in four local varieties: Beyrudi, Hatuni, Sami, and Yabani; and reported that the highest rooting success rate of 31.70% was obtained with the 5000 ppm IBA application in the Beyrudi local variety. Yıldız et al. (2009), in their rooting study on black mulberry cuttings with different hormone doses at different periods, found that while no rooting was achieved with 7500 ppm IBA application, a rooting success rate of 24.00% was obtained with 6000 ppm IBA application. Although there was no statistically significant difference in the rooting success of green and semi-hardwood cuttings with different hormone dose applications, it was reported that the rooting percentage increased with increasing dose. Ekizoğlu (2010) took cuttings in March, July and November, and applied 2000 ppm, 4000 ppm and 6000 ppm IBA doses. The cuttings, planted in a perlite medium without bottom heating under a misting unit in a greenhouse environment, were left to root for 90 days. In black mulberry, the highest rooting success was obtained in November with 96.11% at 2000 ppm IBA application, while the best rooting degree was obtained in March with 4000 ppm IBA application (2.27). Edizer et al. (2016) applied 0, 4000, 6000, 8000 ppm IBA and 3000 ppm IBA + 150 ppm NAA doses to the base of the cuttings using the rapid dipping method. The cuttings were kept in perlite in a bottom-heated misting greenhouse for approximately 3 months before being removed. No rooting occurred in the control plants. The best rooting rate (66.70%), average number of roots (3), average root length (43.40 mm) and usable cutting rate for seedling production (43.33%) were obtained from the 8000 ppm IBA application. Increasing the IBA doses increased rooting. In the 66MSB01 genotype, the highest number of roots (6.3 ± 0.9 and 6.3 ± 2.1 roots) was obtained from the 2000 ppm and 8000 ppm IBA applications. The highest root length (7.3 ± 1.4 cm) in this genotype was obtained from the Control application. In the 66MSB03 genotype, the highest number of roots (5.3 ± 0.5 roots) was obtained from the Bacteria + 4000 ppm IBA application.

The highest root length (6.9 ± 1.8 cm) in this genotype was also obtained from the Bacteria + 4000 ppm IBA application. In the 66ÇKR04 genotype, the highest number of roots (3.3 ± 0.6 roots) was obtained from the 8000 ppm IBA application. The highest root length (3.3 ± 1.2 cm) in this genotype was also obtained from the Bacteria + 8000 ppm IBA application (Tablo 3). Ekizoğlu (2010) reported that the number of roots was 11.45 in white mulberry and 5.85 in black mulberry, the root length was 20.34 cm in white mulberry and 10.27 cm in black mulberry, and the degree of fibrous root formation was 1.50 in white mulberry and 0.89 in black mulberry. Edizer et al. (2016) determined that there was no significant difference in the number of roots among the growth regulator applications. The highest average number of roots was obtained with the 8000 ppm IBA application (2.97), and the lowest number of roots was obtained with the 4000 ppm IBA application (1.83). They stated that increasing the dose of growth regulators increased root length, with the longest root length of 43.40 mm obtained with the 8000 ppm IBA application, followed by 23.79 mm with the 6000 ppm IBA application and 20.02 mm with the 4000 ppm IBA application.

The highest fresh root weight of the 66MSB01 genotype was obtained from the 8000 ppm IBA application, with 6.387 g, and the highest dry root weight was obtained from the 1.946 g application. The dry root percentage was 48.6%, obtained from the 4000 ppm IBA application. The highest fresh root weight of the 66MSB03 genotype was obtained from the Bacteria + 4000 ppm IBA application, with 5.575 g, and the highest dry root weight was obtained from the 6000 ppm IBA application, with 1.382 g. The dry root percentage was 33.1%, obtained from the Bacteria + 8000 ppm IBA application. In the 66ÇKR04 genotype, the highest fresh root weight (0.735 g) and the highest dry root weight (0.159 g) were obtained from the Bacteria + 8000 ppm IBA application, while the highest dry root percentage (32.9%) was obtained from the 6000 ppm IBA application (Table 3).

Table 3. Root performance of hardwood cuttings of black mulberry genotypes.

Genotypes	Applications	Number of Roots (pieces)	Root Length (cm)	Fresh Root Weight (g)	Dry Root Weight (g)	Dry Root Rate (%)
66MSB01	Control	3	7.3±1.4	0,810	0,240	29,6
	2000 ppm IBA	6.3±0.9	4.4±2.1	2,806	1,000	35,6
	4000 ppm IBA	4.3±0.5	5.3±1.9	1,763	0,857	48,6
	6000 ppm IBA	4.0±1.6	6.2±2.3	4,403	1,161	26,4
	8000 ppm IBA	6.3±2.1	5.6±3.4	6,387	1,946	30,5
	Bacteria	3.3±1.2	4.8±1.9	3,097	0,824	26,6
	Bacteria+2000 IBA	ppm 2.7±0.5	5.5±2.5	4,747	1,803	37,9
	Bacteria+4000 IBA	ppm 2.7±0.5	3.6±1.4	0,760	0,196	25,8
	Bacteria+6000 IBA	ppm 3.3±1.2	6.4±1.9	4,403	1,623	36,9
	Bacteria+8000 IBA	ppm 5.0±0.8	8.8±7.1	4,380	1,370	31,3
66MSB03	Control	1.5±0.5	2.3±0.4	0,381	0,099	25,9
	2000 ppm IBA	3.0±1.0	3.3±1.1	0,520	0,140	26,9
	4000 ppm IBA	2	1.3±0.4	0,345	0,096	27,7
	6000 ppm IBA	3.8±0.8	6.2±1.9	4,511	1,382	30,6
	8000 ppm IBA	2	3.0±0.9	0,507	0,130	25,7
	Bacteria	2	1.7±0.5	0,547	0,140	25,6
	Bacteria+2000 IBA	ppm 2	2.6±0.7	0,385	0,099	25,6
	Bacteria+4000 IBA	ppm 5.3±0.5	6.9±1.8	5,575	1,348	24,2
	Bacteria+6000 IBA	ppm 4.0±1.0	4.5±1.0	4,752	1,143	24,1
	Bacteria+8000 IBA	ppm 2	2.4±0.9	0,452	0,150	33,1
66ÇKR04	Control	2.0	2.2±0.6	0,521	0,140	26,8
	2000 ppm IBA	2.0±0.0	2.7±0.7	0,511	0,139	27,1
	4000 ppm IBA	2.0	2.6±0.6	0,524	0,149	28,5
	6000 ppm IBA	2	2.6±0.5	0,456	0,150	32,9
	8000 ppm IBA	3.3±0.6	2.5±0.4	0,369	0,059	15,8
	Bacteria	2	1.8±0.5	0,475	0,130	27,3
	Bacteria+2000 IBA	ppm 0	-	-	-	-
	Bacteria+4000 IBA	ppm 0	-	-	-	-
	Bacteri +6000 IBA	ppm 0	-	-	-	-
	Bacteria+8000 IBA	ppm 3.0±0.6	3.3±1.2	0,735	0,159	21,7

4. Conclusion and Recommendations

There are significant differences in the rooting ability of cuttings from mulberry genotypes selected from Yozgat. In our study, the highest rooting rates were achieved with the following applications: 6000 ppm IBA for genotype 66MSB01; Bacteria + 4000 ppm IBA for genotype 66MSB03; and 8000 ppm IBA for genotype 66ÇKR04. The differing results in the literature may be due to genetic differences, ecological conditions in the rooting medium, and the timing of cutting collection. Our study shows that increasing the dose of different growth regulators and bacteria increases the rooting percentage. It is considered appropriate to investigate the use of high doses of growth regulators in future studies on this subject.

Thanks and Information Note

We would like to thank Yozgat Bozok University Project Coordination, Implementation and Research Center (BAP) for their financial support to our project number FLO-2025-1823.

References

- Asımgil, A. (1997). *Medicinal Plants*. Timaş Publications. İstanbul. 352 s.
- Aydoğmuş, Ş. (2025). *Determination of Phenological, Morphological and Pomological Characteristics of Black Mulberry (Morus nigra L.) Genotypes Grown in Yozgat Province*. Yozgat Bozok University School Of Graduate Studies, Horticulture Department, 111 sf.
- Edizer, Y., Gökçek, O., Saraçoğlu, O. (2016). Effects of Growth Regulator Treatments on Propagation of Black Mulberry (*Morus nigra*) by Woody Cuttings. *Gaziosmanpaşa University Faculty of Agriculture Journal*, 33 (3), 92-96.
- Ekizoğlu, C. (2010). *A Study on the Propagation of White Mulberry (Morus alba L.) and Black Mulberry (Morus nigra L.) by Cuttings*. Ordu University, Institute of Science, Department of Horticulture, 64 sf.
- Erdoğan, V., Aygün, A. (2006). *A study on the propagation of black mulberry (Morus nigra L.) by green cuttings*. II. National Symposium on Berry Fruits, Tokat, 172-175.
- Erdoğan, Ü., Pırlak, L., Çakmakçı, R. (2006). *Research on rooting mulberry (Morus spp.) cuttings*. II. National Symposium on Berry Fruits., Tokat, 193-198.
- Göktepe, Ç.K., Akın, N. (2024). Berries: Their Effects on Healthy Nutrition. *Bursa Uludağ University Faculty of Agriculture Journal*, 38(2), s. 457-485.
- Karadeniz, T., Şişman, T. (2003). *Fruit characteristics and propagation by cuttings of white and black mulberry*. National Kiwi and Berry Fruits Symposium, Ordu, 428-432.
- Koyuncu, F., Vural, E., Çelik, M., 2003. *Research on rooting black mulberry (Morus nigra L.) cuttings*. National Kiwi and Berry Fruits Symposium, Ordu, 424-427.
- Kumlay, A.M. & Eryiğit, T. (2011). *Plant Growth and Development Regulators: Plant Hormones*. Iğdır University Journal of Science Institute, 1:47-56.
- Lale, H., Özçağırın, R. (1996). A study on pomological, phenological, and some fruit quality characteristics of mulberry varieties. *Derim*, 13(4): 177-182.
- Machii, H., Koyama, A., Yamanouchi, H., Matsumoto, K., Kobayashi, S., Katagiri, K. (2002). *A list of morphological and agronomical traits of mulberry genetic resources*. Misc. Publ. Natl. Inst. Seric. Entomol. Sci., 29: 1-307.
- Martin, G., Reyes, F., Hernández, I., Milera, M. (2002). *Agronomic studies with mulberry in Cuba*. Mulberry for Animal Production, FAO Animal Production and Health Paper, 147:103-114.
- Özkan, Y., Arslan, A. (1996). *Research on the Propagation of Black Mulberry (Morus nigra L.) by Wood and Soft Cuttings*. Gaziosmanpaşa University Publications, Volume 12, Issue 1. Tokat.
- Polat, A. A. (2008). *Effect Of Indolebutyric Acid On Rooting Of Mulberry Cuttings*. Acta Hort. (ISHS) 774:351-354.
- Prior, R. L., Cao, G., Martin, A., Sofic, E., McEwen, J., O'Brien, C., Lischner, N., Ehlenfeldt, M., Kalt, W., Krewer, G., & Mainland, C. M. (1998). Antioxidant capacity as influenced by total phenolic and anthocyanin content, maturity, and variety of Vaccinium species. *Journal of agricultural and food chemistry*, 46(7), 2686-2693.

- Ryu, K. S. (1977). Mulberry cultivation and mulberry farming in Turkey (Publication No. 60, p. 89). Publications of the Sericulture Research Institute.
- Şenel, A. E. (2002). A Study on the Propagation of Some Mulberry Species (*Morus* sp.L.) by Cuttings. Süleyman Demirel University, Institute of Science, Department of Horticulture, Master's Thesis, Isparta. 66 s.
- Ünal, A., Özçağırın, R., Hepaksoy, S. (1992). *A Study on the Rooting of Hardwood Cuttings in Black Mulberry and Purple Mulberry Varieties*. 1st National Horticultural Congress, Volume I, 267-270 pp, İzmir.
- Yıldız, K., Koyuncu, F. (1999). *A Study on the Propagation of Black Mulberry (*Morus nigra* L.) by Woody Cuttings*. II. National Horticultural Congress. Volume I., 130-135 pp, Adana.
- Yıldız, K. & Koyuncu, F. (2000). A Study on the Propagation of Black Mulberry (*M. nigra* L.) by Hardwood Cuttings. *Derim*, 17: 130-135.
- Yıldız, K., Çekiç, Ç., Güneş, M., Özgen, M., Özkan, Y., Akça, Y., Gerçekçioğlu, R. (2009). Determination of Rooting Success in Black Mulberry (*Morus nigra* L.) Cuttings Taken at Different Periods. *GOU Journal of the Faculty of Agriculture*, 26(1), 1-5.

**SİLİKON NANOPARTİKÜL UYGULAMASININ MICHELE PALIERİ ÜZÜM ÇEŞİDİNDE
SEKONDER METABOLİT ÜRETİMİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Emine Sema ÇETİN

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 66100 Yozgat/TÜRKİYE
esema.cetin@yobu.edu.tr

ORCID: 0000-0001-7601-8491

Öznur YETİŞİR

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 66100 Yozgat/TÜRKİYE

ORCID: 0009-0004-8666-4402

Berna KELES

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 66100 Yozgat/TÜRKİYE
berna.keles@yobu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-6723-283X

ÖZET

Tarımda verim artışını sağlamak, hastalık ve zararlılara karşı bitkileri korumak gibi amaçlarla kullanılan kimyasallar ekosistemin bozulmasına neden olmaktadır. Son zamanlarda kalıntı etkisi olmaksızın bitkide büyüme ve gelişmeyi düzenleyen, verim artışı sağlayan ve strese karşı da dayanımı sağlayan çevreci yaklaşımlar geliştirilmektedir. Nanoteknolojik yöntemler de bunlardan birisidir. Nanoteknoloji, tıp, kimya, ilaç, kozmetik, tarım, çevre, enerji gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu tekniklerin tarımda kullanılması ise “Fitonanoteknoloji” olarak tanımlanmaktadır. Tohum çimlenme aşamasından başlayarak fide-fidan gelişim dönemleri ve sonrasında verim dönemleri olmak üzere çok farklı dönemlerde bu teknoloji başarıyla kullanılmakta, her geçen gün de kullanım alanları artmaktadır. Son zamanlarda ise nanopartiküllerin (NP) bitki bileşenlerinin sentezi üzerine de etkili olduğu, nano-elisitör olarak adlandırılan bu kullanım şekli ile bitkide bulunan bileşenlerin sentezi artırılarak insan sağlığı üzerindeki olumlu etkilerinden daha fazla yararlanılabilmesi mümkün olduğu ortaya çıkarılmıştır. Silikon, inorganik ürünler grubunda yer alan, yerkabuğunda en çok bulunan ikinci elementtir. Toprakta silikon genellikle çözünmez kuvars veya silikatlar halinde bulunmaktadır. Silikon üzerinde yapılmış araştırmalarda özellikle stresin zararlarını azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Bu araştırma ile de farklı dozlarda (50, 100, 150 mg/L) SiO₂ NP uygulanmış Michele Palieri üzüm çeşidinde tanelerdeki fenolik bileşikler ile bazı hormon miktarları incelenmiştir. Araştırma sonucunda silikon NP uygulamalarının asmada bu amaçla kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Üzüm, nanoteknoloji, fenolik bileşik, fitohormon

**THE EFFECT OF SILICONE NANOPARTICLE APPLICATION ON SECONDARY
METABOLITE PRODUCTION IN MICHELE PALIERI GRAPE VARIETY**

ABSTRACT

Chemicals used in agriculture to increase yield and protect plants against diseases and pests cause ecosystem degradation. Recently, environmentally friendly approaches are being developed that regulate plant growth and development, increase yield, and provide resistance to stress without residue effects. Nanotechnological methods are one of these. Nanotechnology is used in various fields such as medicine, chemistry, pharmaceuticals, cosmetics, agriculture, environment, and energy. The use of these techniques in agriculture is defined as "Phytonanotechnology." This technology is successfully used in many different periods, starting from the seed germination stage, through seedling and sapling development, and subsequently during the yield period, and its areas of application are increasing every day. Recently, it has been revealed that nanoparticles (NPs) are also effective in the synthesis of plant components, and that with this application method, called nano-elicitors, it is possible to increase the synthesis of components found in plants and benefit more from their positive effects on human health. Silicon, which belongs to the group of inorganic products, is the second most abundant element in the Earth's crust. In soil, silicon is generally found in the form of insoluble quartz or silicates. Research on silicon has shown it to be particularly effective in reducing the harmful effects of stress. This study examined the levels of phenolic compounds and certain hormones in the berries of the Michele Palieri grape variety, which was treated with different doses (50, 100, 150 mg/L) of SiO₂ NP. The results of the study indicate that silicon NP applications have high potential for use in grapevines for this purpose.

Keywords: Grape, nanotechnology, phenolic compounds, phytohormones

1. Giriş

Günümüzde tıp, kimya, ilaç, gıda, kozmetik, tekstil, tarım, çevre, enerji, elektronik ve ulaşım gibi çeşitli alanlarda kullanımı söz konusu olan nanoteknoloji (Rai ve Ingle, 2012; Judy ve Bertsch, 2014; Woldeamanuel vd., 2021), geleneksel mikroskoplarla görüntülenemeyecek kadar küçük bir ölçü birimi olan nano düzeyinde geliştirilen, 1 ile 100 nanometre arasında değişen birimlerde gerçekleştirilen teknolojiler olarak tanımlanmaktadır. Küçük boyutlu olması, aynı etkinin daha küçük hacimlerde alınabilmesi, yavaş bir salınım göstererek pek çok yönden toksisitenin önüne geçilebilmesi ile büyük avantajlar sunan bir tekniktir. Böylece ürünler daha etkin, işlevsel ve dayanıklı hale getirilmekte, ayrıca enerji ve hammadde tasarrufu sağlanmaktadır (Kuzma ve Verhage, 2006; Iravani vd., 2014).

Nanoteknolojik yöntemlerin tarımda kullanılması “Fitonanoteknoloji” olarak tanımlanmaktadır (Wang vd., 2016; Fincheira vd., 2019). Tarım sektöründe nanoteknolojik yöntemler tohum çimlenme aşamasından başlayarak fide-fıdan gelişim dönemleri ve sonrasında verim dönemleri olmak üzere çok farklı dönemlerde başarıyla kullanılmaktadır (Kamle vd., 2020). Burada küçük boyutlu olması, aynı etkinin daha küçük hacimlerde alınabilmesi, yavaş bir salınım göstererek pek çok yönden toksisitenin önüne geçilebilmesi tekniğin önemli üstünlükleri olarak görülmektedir (Biju vd., 2008; Raliya vd., 2017; Shende vd., 2021; Jampilek ve Kralova, 2021; Tarrahi vd., 2021). Bu özelliklerinden yararlanılarak bitkisel ürünlerin muhafaza süresini artırabilmede (Berekaa, 2015), pestisit olarak kullanımında (Duncan vd., 2011), nano-biyoremediasyonda (Rajput vd., 2021; Shende vd., 2021) kullanımı söz konusu olmaktadır. Bunun dışında tarımsal alanda kullanımının her geçen gün arttığı da bilinmektedir (Chauhan vd., 2020; Usman vd., 2020; Yadav vd., 2020).

Silikon, inorganik ürünler grubunda yer alan bir biyostimülantdır. Yerkabuğunda en çok bulunan ikinci elementtir. Bitkilerde özellikle stres üzerindeki olumlu etkiler gösterdiği bilinmektedir. Toprakta silikon genellikle çözünmez kuvars veya silikatlar halinde bulunmaktadır. Bitkide çoğunlukla uç noktalarda birikim göstermektedir (Savvas ve Ntatsi, 2015). En yüksek konsantrasyonlar genellikle terlemenin yüksek olduğu stoma çevrelerinde ulaşılmaktadır. Biyotik ve abiyotik stres toleransı, hastalık ve zararlılara karşı dirençte etkili olmaktadır. Bununla birlikte silisyumun abiyotik streslere, hastalıklara ve patojenlere karşı mekanizmaları tam olarak anlaşılamamıştır.

Silikon (Si) ve silika (SiO₂) nanopartikül üzerinde yapılmış araştırmalarda özellikle yüksek sıcaklık, tuzluluk, kuraklık ve ağır metal toksisitesi gibi abiyotik stres koşulları altında stresin olumsuz etkilerini azaltmada etkili olduğunu, büyüme ve gelişmeyi teşvik ettiğini ve farklı savunma mekanizmalarını ve antioksidan sistemlerini aktive ettiğini göstermektedir (Ma, 2004; Liang vd., 2007; Jampilek ve Kralova, 2021).

Bitkiler bilindiği üzere içermiş oldukları bileşenler ile insan sağlığı üzerinde çok çeşitli yönde etkiler göstermektedir. Nanoteknolojik ürünlerin bir diğer kullanım alanı da bitkilerdeki bu bileşenlerin sentezi üzerinde etki gösterme potansiyelleridir. Nano-elisitör olarak adlandırılan bu kullanım şekli ile bitkide bulunan bileşenlerin sentezi artırılarak insan sağlığı üzerine olan olumlu etkilerinden daha fazla yararlanılabilme potansiyeli söz konusu olmaktadır.

Bu alanda yapılmış çalışmalarda bitkilerde bulunan bu çok çeşitli bileşenlerin farklı nanoteknolojik uygulamalarla artırılabilmesine ilişkin çok çeşitli örnekler gösterilmektedir. Jasim vd. (2017), Ag NP uygulamalarının, *Trigonella foenum-graecum* (çemen otu) bitkisinde birer sekonder etaboolit olan diosgenin içeriğini artırdığını ifade etmişlerdir. Golkar vd. (2019), stevia (*Stevia rebaudiana*) bitkisinin in vitro koşullarda elde edilmiş kalluslarında steviosid miktarını artırdığını kanıtlamışlardır. Benzer şekilde Ramezannezhad vd. (2019), ekinezya (*Echinacea purpurea*)’nın in vitro hücre süspansiyon kültürlerinde şikorik asit üretimini ciddi anlamda artırdığını; Karakas (2020), çivit otu bitkisinde aynı zamanda birer boya maddesi olarak kullanım alanı olan indigo ve triptantrin konsantrasyonlarının artırılmasına önemli katkılar sağladığını ortaya koymuşlardır. Nanede bakır nanopartiküllerin kullanıldığı bir araştırmada kamfen, phellandrene ve limonen seviyeleri artırılmıştır (Lafmejani vd., 2018). Zhao vd. (2022) de tuz stresi altında çileklerin büyümesi ve meyve kalitesi üzerine Ce NP nin etkisini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda meyvelerde antosiyaninler, fenolik bileşikler ve C vitamini içeriklerinin arttığını ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde farklı nanopartikül uygulamaları ile bitkilerde çeşitli sekonder bileşenlerin artırıldığına ilişkin çalışmalar bulunmaktadır (Sharafi vd., 2013; Ghasemi vd., 2015; Kahila vd., 2018; Tian vd., 2018; Chung vd., 2019; Garcia-Lopez vd., 2019; Nourozi vd., 2019; Rezaei vd., 2019; Rezaizad vd., 2019; Shabbir vd., 2019; Taghizadeh vd., 2019; Wesolowska vd., 2019; Lala, 2020; Modarresi vd., 2020; Rahimi vd., 2020; Wang vd., 2020; Zaeem vd., 2020).

Asmada sekonder metabolit birikimini artırmaya yönelik NP uygulaması ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma ile de renkli, sofralık bir üzüm çeşidi olan Michele Palieri üzüm çeşidinde SiO₂ NP uygulamalarının tanelerde sekonder metabolit birikimi üzerine etkili olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Araştırma, 2025 -2026 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Uygulamalar Yozgat Merkez Köylerinden olan Recepli Köyü'nde 5 da arazi üzerine tesis edilmiş, 1103 Paulsen Amerikan asma anacı üzerine aşılanmış Michele Palieri üzüm çeşidinden oluşan 9 yaşındaki bağda yapılmıştır. Uygulamalara geçmeden önce kış budamasında denemenin yapılacağı bağda öncelikle seçilen tüm omcalarda eşit sayıda göz bırakılmış olmasına dikkat edilerek kış budaması işlemleri yapılmıştır. Sonrasında tüm vejetasyon dönemi içerisinde bağda rutin uygulanan bakım işlemlerinin ve külleme mücadelesinin dışında nanopartikül uygulaması dışında herhangi bir uygulama yapılmamıştır.

Nanopartikül SiO₂ özel bir firmadan temin edilmiştir. 28 nm boyutunda, %26'lık olarak suda çözünmüş sıvı formda hazırlanan SiO₂ NP, 3 farklı konsantrasyonda (kontrol, 50, 100, 150 mg/L) uygulanmıştır. Uygulamalar, çeşidin fenolojik gözlemleri baz alınarak tanelerin koruk safhasında, ben düşme döneminde ve hasattan 10 gün önce olacak şekilde 3 ayrı dönemde yapılmış, kontrol omcalarına herhangi bir uygulama yapılmamıştır. Olgunlaşma döneminde salkım örnekleri alınmış, laboratuvara getirilmiş ve analiz sürecine kadar derin dondurucuda muhafaza edilmiştir.

Analizlerin bir kısmı Yozgat Bozok Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölüm Laboratuvarında, bir kısmı ise Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

2.1. Fenolik bileşik ekstraksiyonu

Fenolik maddelerin belirlenmesi amacıyla ekstraksiyon işlemleri Caponio vd. (1999)'nin metoduna göre yapılmıştır. Elde edilen ekstrakt daha sonra toplam fenolik bileşik, toplam flavonol, toplam flavanol ve HPLC de fenolik bileşiklerin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Analizler 3 tekrerrülü olarak yapılmıştır.

Toplam fenolik bileşik miktarları Folin Ciocalteu kolorimetrik metodu kullanılarak Singleton ve Rossi (1965)'ye göre yapılmıştır. Spektrofotometrede okumalar 765 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiş olup, standart gallik asit çözeltisinden hazırlanacak kurveden yararlanılarak, toplam fenolik madde miktarları gallik asit eşdeğeri (Gallic Acid Equivalent, GAE) olarak belirlenmiştir.

Toplam flavonoller Neu solusyonu kullanılarak Dai vd. (1995)'ne göre yapılmış, toplam flavonollerin miktarı, rutin standardından hazırlanmış olan körveden yararlanılarak, rutin eşdeğeri olarak (Rutin Equivalent, RE) mg/g şeklinde belirlenmiştir.

Toplam flavanoller Arnous vd. (2001)'ne göre DMAC (dimetil amino sinnamealdehit) metodu kullanılarak gerçekleştirilmiş, sonuçlar kateşin standardından hazırlanmış olan körveden yararlanılarak, kateşin eşdeğeri (Catechin Equivalent, CE) (mg/g) cinsinden sunulmuştur.

Fenolik bileşiklerin tanımlanması HPLC (Shimadzu Prominence, Tokyo, Japonya) ile gerçekleştirilmiştir. Analizler Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nden yararlanılmıştır. Fenolik bileşiklerin tanımlanmasında modifiye edilmiş Gomes vd. (1999)'nin metodu kullanılmış, fenolik bileşikler içerisinde asmada ve üzümde en fazla bulunan gallik asit, 3,4-dihidroksi benzoik asit, klorogenik asit, 4-dihidroksi benzoik asit, 2,5- dihidroksi benzoik asit, vanilik asit, kafeik asit, epikateşin, p-kumarik asit, ferulik asit, rutin, ellajik asit, sinamik asit ve kuersetin ile resveratrol miktarları tespit edilmiştir.

2.2. Verilerin değerlendirilmesi

Araştırma 3 tekrerrülü ve her tekrerrüde 5 omca olacak şekilde yürütülmüştür. Deneme sonunda elde edilen veriler tesadüf blokları deneme desenine göre SPSS 20 istatistik programında değerlendirilmiş, ortalamalar arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre belirlenmiştir (p<0,05).

3. Bulgurular ve Tartışma

Asmada farklı dozlarda SiO₂ NP uygulamasının spektrofotometrik olarak belirlenen fenolik bileşik miktarları üzerine etkisi Çizelge 1 de sunulmuştur. Çizelge 1'in incelenmesi ile de anlaşılabacağı üzere

asma bitkisine uygulanan farklı dozlardaki SiO₂ NP nin toplam fenolik madde, toplam flavonol ve toplam flavanol miktarları üzerinde istatistiksel olarak önemli etkiler meydana getirmiştir.

Çizelge 1. Spektrofotometrik olarak belirlenen fenolik bileşik miktarları

SiO ₂ (mg/L)	NP (mg/g GAE)	Toplam fenolik madde (mg/g RE)	Toplam flavonol (mg/g CE)	Toplam flavanol
Kontrol	3,145* c	0,021 c	0,021 c	
50	3,526 c	0,030 bc	0,027 bc	
100	4,938 b	0,098 a	0,062 a	
150	7,412 a	0,043 b	0,034 b	

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmaktadır (p<0.05).

Elde edilen bulgular, tüm parametrelerde kontrol grubuna kıyasla NP uygulamalarının fenolik bileşik miktarını artırdığını ortaya koymaktadır. Toplam fenolik madde miktarı bakımından kontrol grubunda 3,145 mg/g GAE olan içerik, artan dozlarla birlikte yükselmiş ve en yüksek seviyesine 150 mg/L uygulamasında (7.412 mg/g GAE) ulaşmıştır (p<0.05). Bu durum, SiO₂ NP uygulamasının asma bitkisinde fenilpropanoid yolunu güçlü bir şekilde stimüle ettiğini göstermektedir. Toplam flavonol ve flavanol bileşiklerinin ise toplam fenolik madde içeriğinden farklı bir grafik gösterdiği, her iki parametrede de en yüksek birikimin 100 mg/L SiO₂ NP uygulamasında (sırasıyla 0,098 mg/g RE ve 0,062 mg/g CE) olduğu görülmektedir. Uygulama dozunun 150 mg/L'ye çıkarılmasıyla birlikte bu değerlerde belirgin bir düşüş (sırasıyla 0,043 ve 0,034 mg/g) meydana gelmiştir. Bu durumun, 100 mg/L dozunun flavonol ve flavanol biyosentezini tetikleyen enzimler için optimum ve kritik bir eşik dozu olduğunu, bu dozun aşılması durumunda (150 mg/L) bir inhibisyon mekanizmasının devreye girmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Asma bitkisine uygulanan farklı SiO₂ NP konsantrasyonlarının, HPLC ile belirlenen fenolik bileşikler üzerindeki etkisi ise Çizelge 2. de sunulmuştur. Çizelgenin incelenmesi ile de anlaşılabacağı üzere spektrofotometrik analizlerde gözlenen doza bağlı değişimler spesifik fenolik bileşik düzeyinde de gözlenmektedir.

Kateşin ve epikateşin flavonoid yolağının son basamaklarında sentezlenen bileşiklerdir. Resveratrol ise flavonollerle aynı öncül molekülü (p-kumaroil-CoA) kullanan Stilben Sentaz (STS) enzimi tarafından üretilen bir bileşik olup bu üç bileşiğin 100 mg/L'de senkronize bir şekilde pik yapması uygulanan NP nin asmada fitoaleksinin ve kateşin mekanizmasını 100 mg/L dozunda optimum düzeyde etkilediğini göstermektedir. 150 mg/L'de bu değerlerin neredeyse kontrol düzeyine tekrar düşmüş olması yüksek dozda bu spesifik enzimlerin baskılanma yaşadığını düşündürmektedir. 3,4-dihidroksi benzoik asit ve vanilik asit her ikisi de 100 mg/L dozunda en yüksek seviyelerine ulaşmıştır (sırasıyla 0,986 ppm ve 0,972 ppm). Kontrol grubuna göre meydana gelen bu artış, 100 mg/L seviyesinin anılan bileşiklerin biyosentezini yürüten enzim yollarını maksimum düzeyde aktive ettiğini göstermektedir.

Gallik asitin de 100 mg/L dozunda pik yaptığı (0,029 ppm), 4-hidroksi benzoik asit ve 2,5-di hidroksi benzoik asit miktarının diğer benzoik asitlerden farklı olarak 50 mg/L düşük NP dozunda yüksek bir birikim (sırasıyla 0,359 ppm ve 0,401 ppm) gösterdiği görülmektedir. Bu durum, bileşik sentezinde etkili enzimlerin çok düşük NP dozlarına dahi yüksek hassasiyetle yanıt verdiğini göstermektedir.

Kafeik ve klorogenik asit, kontrol grubunda oldukça düşük olan bu iki güçlü antioksidan bileşik, 50 ve 100 mg/L uygulamalarıyla çok yüksek seviyelere yükselmiştir. Özellikle kafeik asit kontrolde 27,912 ppm iken 50 mg/L dozunda 181,311 ppm'e ulaşarak en yüksek değerini almıştır. Klorogenik asit ise 100 mg/L dozunda zirve yapmıştır (59,408 ppm). Bu durum, nano silisyumun fenilpropanoid yolağındaki enzimleri şiddetli bir şekilde uyardığını göstermektedir.

Çizelge 2. HPLC ile belirlenen fenolik bileşik miktarları (ppm)

SiO ₂ NP (mg/L)	Kateşin	Ellajik asit	Epikateşin	Gallik asit	3,4 dihidroksi benzoik asit	4-hidroksi benzoik asit	Kafeik asit	Naringin	Sinamik asit	2,5dihidroksi benzoik asit	Vanilik asit	p-kumarik asit	Ferulik asit	Klorogenik asit	Rutin	Kuersetin	Resveratrol
Kontrol	1,912 b	86,027 c	18,921 b	10,018 c	0,041 c	0,071 b	27,912 d	1,395 a	0,049 a	0,115 b	0,052 c	0,301 c	0,011 c	23,501 c	1,307 b	0,116 c	1,912 b
50	1,927 b	198,503 a	20,316 b	10,020 bc	0,045 c	0,359 a	181,311 a	0,487 b	0,021 b	0,401 a	0,127 b	0,307 c	0,011 c	58,637 a	1,303 b	0,142 c	1,927 b
100	2,403 a	91,470 bc	63,482 a	10,029 a	0,986 a	0,087 b	169,348 b	0,395 b	0,035 ab	0,404 a	0,972 a	0,396 b	0,087 a	59,408 a	1,309 b	1,127 a	2,403 a
150	1,946 b	94,912 b	19,647 b	10,024 b	0,756 b	0,079 c	159,707 b	0,648 b	0,024 b	0,115 b	0,142 b	0,532 a	0,045 b	27,321 b	2,809 a	0,367 b	1,946 b

* Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmaktadır (p<0.05).

p-Kumarik asit diğer sinamik asitlerin aksine maksimum birikimini 150 mg/L olan en yüksek NP dozunda göstermiştir. Hücre duvarı kalınlaşması ve lignifikasyonda kritik rol oynayan bu bileşiğin yüksek dozda artması, bitkinin yüksek NP konsantrasyonuna karşı fiziksel bir savunma bariyeri oluşturma eğiliminde olduğunu düşündürmektedir. Kuersetin spektrofotometrik olarak belirlenen toplam flavonol verileriyle tam bir paralellik göstererek 100 mg/L dozunda en yüksek seviyeye (1,127 ppm) ulaşmıştır. Rutin ise diğer tüm bileşiklerden farklı olarak 150 mg/L dozunda en yüksek değerini (2,809 ppm) almıştır. Bu durum, yüksek elisitör yükü altında kuersetinin hidrolize edilerek veya glikozillenerek rutine dönüştürüldüğünü, bitkinin serbest kuersetin yerine moleküllü glikozit formunda depolamayı tercih ettiğini düşündürmektedir. Ellajik asit hidrolize olabilen tanenlerin öncülü olup, 50 mg/L dozunda ciddi bir artışla (198,503 ppm) pik düzeye ulaşmıştır. Bu durum asmanın erken dönem ve düşük yoğunluktaki nano-silisyum uyarılarına tanen polimerizasyonunu hızlandırarak yanıt verdiğinin bir göstergesidir. Naringin ve sinamik asit ise kontrol grubunda en yüksek seviyede iken NP uygulamalarıyla birlikte düşüş göstermiştir. Naringin flavonoid yolağının erken aşamalarında yer alan bir bileşik olup, sinamik asit ise yolağın en başındaki moleküldür. Bu iki öncül bileşiğin yüksek NP dozlarında azalmış olması bitkinin bu ham maddeleri (sinamik asit ve naringini) hızla harcayarak bu bileşikler kafeik asit, resveratrol, kuersetin ve kateşin gibi son ürünlere dönüştürdüğünü göstermektedir.

Farklı konsantrasyonlarda uygulanan SiO₂ NP nin asma bitkisinin içsel hormonlar üzerindeki etkileri Çizelge 3'te sunulmuştur. Çizelge'de SiO₂ NP uygulamalarının doza bağlı olarak hormon dengesini ve büyüme-savunma mekanizmasını ciddi şekilde etkilediği görülmektedir.

Çizelge 3. HPLC ile belirlenen bitkisel hormon miktarları (ppm)

SiO ₂ (mg/L)	NP Zeatin	Salisilik Asit	Gibberellik Asit (GA ₃)	Indol Asetik Asit (IAA)	Absisik Asit (ABA)
Kontrol	71,546 d	0,321 c	91,245 b	542,617 d	0,021 d
50	107,821 b	0,117 d	57,321 d	701,149 c	7,365 b
100	78,934 c	3,241 a	75,492 c	1307,574 b	8,502 a
150	648,721 a	2,521 b	147,574 a	2452,307 a	3,204 c

* Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmaktadır (p<0.05).

Bir oksin olan IAA kontrol grubunda 542,617 ppm iken, artan SiO₂ NP dozlarıyla birlikte doğrusal bir artış göstererek 150 mg/L dozunda tepe noktasına (2452,307 ppm) ulaşmıştır. Silisyumun oksin biyosentez genlerini uyardığı ve IAA oksidaz enzim aktivitesini baskılayarak serbest oksin formunu koruduğu bilinmektedir. Oksin ve sitokinin bitkilerde hücre bölünmesi, uzaması, vasküler doku gelişimi ve biyokütle artışından sorumlu temel büyüme olup hormonlarıdır. Zeatin hormonu 50 ve 100 mg/L dozlarında durağan bir seyir izlerken, 150 mg/L dozunda çok ciddi bir artış göstererek 648,721 ppm seviyesine çıkmıştır. En yüksek NP dozu olan 150 mg/L'de hem IAA hem de Zeatin'in eş zamanlı olarak zirve yapması, bu dozda bitkinin metabolik enerjisini hücre bölünmesi ve vejetatif büyümeye yönlendirdiğini göstermektedir. Bu durum, HPLC verilerinde 150 mg/L dozunda kuersetin ve resveratrol gibi savunma bileşiklerinin düşüşünü buna karşılık hücre duvarı yapımında kullanılan rutin ve ferulik asitlerin arttığını biyokimyasal olarak açıklamaktadır.

Hücre uzaması ve enzim aktivasyonunda rol oynayan bir diğer önemli büyüme hormonu gibberellik asit olup, çalışmada bu hormonun 50 ve 100 mg/L NP uygulamasında bir miktar baskılandığı, 150 mg/L dozunda en yüksek seviyeye (147,574 ppm) ulaştığı görülmektedir.

Salisilik asit (SA) ve absisik asit (ABA) bitkilerin strese karşı savunma sinyali olan sistemik kazanılmış direnç (SAR) yolağının temel molekülleridir. Hem SA hem de ABA hormonları 100 mg/L SiO₂ NP uygulamasında en yüksek değerlerine (3,241 ppm ve 8,502 ppm) ulaşmışlardır. SA, fenilpropanoid yolağını ve PAL enzimini aktive eden hormon olup, HPLC verilerinde asmanın fitoaleksinin savunma bileşiği olan resveratrol ile güçlü antioksidanlar olan kuersetin, kateşin, epikateşin ve gallik asit bileşiklerinin de 100 mg/L dozunda en yüksek değere ulaştıkları düşünüldüğünde araştırma sonuçları birbirini doğrular niteliktedir. Uygulama dozunun 150 mg/L'ye çıktığında SA ve ABA seviyelerinin düşmesinin, bitkinin uyarıcı stres fazından çıkmasından ya da yüksek büyüme hormonu seviyelerinin antagonist etkiyle stres hormonlarını baskılamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Araştırma sonuçlarımıza benzer şekilde Jasim vd. (2017), AgNP uygulamalarının, *Trigonella foenum-graecum* (çemen otu) bitkisinde birer sekonder metabolit olan diosgenin içeriğini artırdığını ifade etmişlerdir. Golkar vd. (2019), stevia (*Stevia rebaudiana*) bitkisinin in vitro koşullarda elde edilmiş kalluslarında steviosid miktarını artırdığını kanıtlamışlardır. Nanede bakır nanopartiküllerin kullanıldığı bir çalışmada ise kamfen, phellandrene ve limonen seviyeleri artırılmıştır (Lafmejani vd., 2018). Benzer şekilde Ramezannezhad vd. (2019), ekinezya (*Echinacea purpurea*)'nın in vitro hücre süspansiyon kültürlerinde şikorik asit üretimini ciddi anlamda artırdığını; Karakas (2020) ise çivit otu bitkisinde aynı zamanda birer boya maddesi olarak kullanım alanı olan indigo ve triptantrinin konsantrasyonlarının artırılmasına önemli katkılar sağladığını ortaya koymuşlardır.

Bağcılıkta NP'ler üzerinde sınırlı sayıda olan çalışmanın ilkinde Flame Seedless çeşidine ait fidanların tuza dayanımı üzerine CeO₂ NP'nin etkisi incelenmiştir. Araştırma sonucunda genel olarak CeO₂ NP'leri ile yapılan uygulamanın tuz stresinin olumsuz etkilerini hafiflettiği, yüksek tuzluluk seviyelerinde klorofil hasarını önemli ölçüde iyileştirdiği ifade edilmiştir. Ayrıca kontrol bitkileriyle karşılaştırıldığında GP, APX ve SOD gibi antioksidan enzim aktivitelerinde önemli artışların olduğu da vurgulanmıştır (Gohari vd., 2021). Asmadaki bir diğer çalışma kuraklık stresi üzerine CeO₂ NP'nin etkisini inceleyen bir çalışmadır. Superior Seedless üzüm çeşidine ait fidanlarda yapraktan uygulanan CeO₂ NP (0, 5, 50 ve 500 mg/L)'nin kuraklık stresi üzerine etkisi incelenmiştir. 50 mg/L CeO₂ NP'ler kuraklık stresi altındaki asma fidanlarının agronomik özelliklerini (sürgün uzunluğu, yaprak alanı, sürgün ve kök kuru ağırlıkları) ve fotosentetik parametrelerini (stoma iletkenliği, klorofil a ve klorofil b) önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca SOD, CAT ve APX aktivitesinin önemli ölçüde indüklendiği belirtilmiştir (Daler, 2024).

4. Sonuç

Bitkiler içerdikleri çoğu bileşenler ile insan sağlığı üzerinde çeşitli yönde etkiler göstermektedir. Nanoteknolojik ürünler bitkilerdeki bu bileşenlerin sentezi üzerinde etki göstermektedirler. Nano-elisitör olarak genel bir tanım ile adlandırılan bu kullanım şekli ile bitkide bulunan bileşenlerin sentezi artırılarak insan sağlığı üzerine olan olumlu etkilerinden daha fazla yararlanılabilme potansiyeli söz konusu olmaktadır.

Kaynaklar

- Aktaş, A. H., Şen, S., Yilmazer, M., Çubuk, E. (2005). Determination of Carboxylic Acids in Apple Juice by RP HPLC. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 24(1), 1-6.
- Arnous, A., Makris, D.P., Kefalas, P. (2001). Effect of principal polyphenolic components in relation to antioxidant characteristics of aged red wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 12, 5736-5742.
- Berekaa, M.M. (2015). Nanotechnology in food industry; advances in food processing, packaging and food safety. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4, 345-357.
- Biju, V., Itoh, T., Anas, A., Sujith, A., Ishikawa, M. (2008). Semiconductor quantum dots and metal nanoparticles: Syntheses, optical properties, and biological applications. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391, 2469-2495.
- Caponio, F., Alloggio V., Gomes, T. (1999). Phenolic compounds of virgin olive oil: Influence of paste preparation techniques. *Food Chemistry*, 64, 203-209.
- Chauhan, R., Yadav, H.O.S., Sehrawat, N. (2020). Nanobioremediation: A new and a versatile tool for sustainable environmental clean up-Overview. *Journal of Materials and Environmental Science*, 11, 564-573.
- Chung, I.M., Rekha, K., Rajakumar, G., Thiruvengadam, M. (2019). Elicitation of silver nanoparticles enhanced the secondary metabolites and pharmacological activities in cell suspension cultures of bitter melon. *J. Biotech*, 8, 412.
- Commun, K., Mauro, M.C., Chupeau, Y., Boulay, M., Burrus, M., Jeandet, P. (2003). Phytoalexin production in grapevine protoplasts during isolation and culture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 41, 317-23.
- Dai, G.H., Andary, C., Mondolot, L., Boubals, D. (1995). Involment of Phenolic Compounds in The Resistance of Grapevine Callus to Downy mildew (*Plasmopara viticola*). *European Journal of Plant Pathology*, 101, 541-547.
- Duncan, T.V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 363, 1-24.
- Ferreira, P., Tortella, G., Duran, N., Seabra, A.B., Rubilar, O. (2019). Current applications of nanotechnology to develop plant growth inducer agents as an innovation strategy. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40, 15-30.
- Garcia-Lopez, J.I., Nino-Medina, G., Olivares-Saenz, E., Lira-Saldivar, R.H., Barriga-Castro, E.D., Vazquez-Alvarado, R., Rodriguez-Salinas, P.A., ZavalaGarcia, F. (2019). Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants*, 8, 254.

- Ghasemi, B., Hosseini, R., Dehghan Nayeri, F. (2015). Effects of cobalt nanoparticles on artemisinin production and gene expression in *Artemisia annua*. *Turkish Journal of Botany*, 39, 769-777.
- Golkar, P., Moradi, M., Garousi, G.A. (2019). Elicitation of Stevia glycosides using salicylic acid and silver nanoparticles under callus culture. *Sugar Technology*, 21, 569-577.
- Gomes, T., Caponio, F., Alloggio, V. (1999). Phenolic compounds of virgin olive oil influence of paste preparation techniques. *Food Chemistry*, 64, 203-209.
- Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi, S.V., Zolfaghari, B. (2014). Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 9(6), 385.
- Jampilek, J., Kralova, K. (2021). Nanoparticles for Improving and Augmenting Plant Functions. In *Advances in Nano-Fertilizers and Nano-Pesticides in Agriculture*, Elsevier, Amsterdam.
- Jasim, B., Thomas, R., Mathew, J., Radhakrishnan, E.K. (2017). Plant growth and diosgenin enhancement effect of silver nanoparticles in Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Saudi Pharmaceutical Journal*, 25, 443-447.
- Judy, J.D., Bertsch, P.M. (2014). Bioavailability, toxicity, and fate of manufactured nanomaterials in terrestrial ecosystems. *Advances in Agronomy*, 123, 1-64.
- Kahila, M.M.H., Najy, A.M., Rahaie, M., Mir-Derikvand, M. (2018). Effect of nanoparticle treatment on expression of a key gene involved in thymoquinone biosynthetic pathway in *Nigella sativa* L. *Natural Product Research*, 32, 1858- 1862.
- Kamle, M., Kumar Mahato, D., Devi, S., Soni, R., Tripathi, V., Kumar Mishra, A., Kumar, P. (2020). Nanotechnological interventions for plant health improvement and sustainable agriculture. *J. Biotech*, 10, 168.
- Karakas, O. (2020). Effect of silver nanoparticles on production of indole alkaloids in *Isatis constricta*. *Iranian Journal of Science and Technology*, 44, 621-627.
- Köse, S., Kaklıkkaya, N., Koral, S., Tufan, B., Buruk, K.C., Aydın, F. (2011). Commercial Test Kits and The Determination of Histamine in Traditional (Ethnic) Fish Products-Evaluation Against an EU Accepted HPLC Method. *Food Chemistry*, 125 (4), 1490-1497.
- Kuzma, J., Verhage, P. (2006). Nanotechnology in Agriculture and Food Production: Anticipated Applications. *Woodrow Wilson International*, Washington.
- Lafmejani, Z.N., Jafari, A.A., Moradi, P., Moghadam, A.L. (2018). Impact of foliar application of iron-chelate and iron nano particles on some morphophysiological traits and essential oil composition of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21, 1374-1384.
- Lala, S. (2020). Enhancement of secondary metabolites in *Bacopa monnieri* (L.) Pennell plants treated with copper-based nanoparticles in vivo. *IET Nanobiotechnology*, 14, 78-85.
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.G., Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147, 422-428.
- Ma, J.F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 50, 11-18.
- Modarresi, M., Chahardoli, A., Karimi, N., Chahardoli, S. (2020). Variations of glaucine, quercetin and kaempferol contents in *Nigella arvensis* against Al₂O₃, NiO, and TiO₂ nanoparticles. *Heliyon* 6, e04265.
- Niesen, D.B., Hessler, C., Seeram, N.P. (2013). Beyond resveratrol: a review of natural stilbenoids identified from 2009–2013, *Journal of Berry Research*, 3,181-96.
- Nourozi, E., Hosseini, B., Maleki, R., Mandoulakani, B.A. (2019). Pharmaceutical important phenolic compounds overproduction and gene expression analysis in *Dracocephalum kotschyi* hairy roots elicited by SiO₂ nanoparticles. *Industrial Crops and Products*, 133, 435-446.
- Rahimi, S., Hatami, M., Ghorbanpour, M. (2020). Effect of seed priming with nanosilicon on morpho-physiological characteristics, quercetin content and antioxidant capacity in *Calendula officinalis* L. under drought stress conditions. *Journal of Medicinal Plants Research*, 18,186-203.
- Rai, M., Ingle, A. (2012). Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2), 287-293.
- Rajput, V.D., Singh, A., Minkina, T.M., Shende, S.S., Kumar, P., Verma, K.K., Bauer, T., Gorobtsova, O., Deneva, S., Sindireva, A. (2021). Potential applications of nanobiotechnology in plant

nutrition and protection for sustainable agriculture. In *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection*, John Wiley and Sons Ltd.: Hoboken, NJ.

Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2017). Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: Current state and future perspectives". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6487-6503.

Ramezannezhad, R., Aghdasi, M., Fatemi, M. (2019). Enhanced production of cichoric acid in cell suspension culture of *Echinacea purpurea* by silver nanoparticle elicitation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 139, 261-273.

Rezaei, Z., Jafarirad, S., Kosari-Nasab, M. (2019). Modulation of secondary metabolite profiles by biologically synthesized MgO/perlite nanocomposites in *Melissa officinalis* plant organ cultures. *Journal of Hazardous Materials*, 380, 120878.

Rezaizad, M., Hashemi-Moghaddam, H., Abbaspour, H., Gerami, M., & Mueller, A. (2019). Photocatalytic effect of TiO₂ nanoparticles on morphological and photochemical properties of stevia plant (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Sugar Technology*, 21, 1024-1030.

Savvas, D., & Ntatsi, G. (2015). Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 66-81.

Shabbir, A., Khan, M.M.A., Ahmad, B., Sadiq, Y., Jaleel, H., Uddin, M. (2019). Efficacy of TiO₂ nanoparticles in enhancing the photosynthesis, essential oil and khusimol biosynthesis in *Vetiveria zizanioides* L. Nash. *Photosynthetica*, 57, 599-606.

Sharafi, E., Fotokian, M.H., Davoodi, D., Hasanloo, H.H. (2013). Improvement of hypericin and hyperforin production using zinc and iron nano-oxides as elicitors in cell suspension culture of St John's wort (*Hypericum perforatum* L.). *International Journal of Modern Physics B*, 2, 177-184.

Shende, S., Rajput, V., Gade, A., Minkina, T., Sushkova, S.N., Mandzhieva, S.S., Boldyreva, V.E. (2021). Metal-based green synthesized nanoparticles: Boon for sustainable agriculture and food security. *IEEE Trans NanoBioscience*, 21(1), 44-54.

Singleton, V.L., Rossi, J.R. (1965). Colorimetry of Total Phenolics With Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144-158.

Taghizadeh, M., Nasibi, F., Kalantari, K.M., Ghanati, F. (2019). Evaluation of secondary metabolites and antioxidant activity in *Dracocephalum polychaetum* Bornm. cell suspension culture under magnetite nanoparticles and static magnetic field elicitation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 136, 489-498.

Tarrahi, R., Mahjouri, S., Khataee, A. (2021). A review on in vivo and in vitro nanotoxicological studies in plants: A headlight for future targets. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111697.

Tian, H., Ghorbanpour, M., Kariman, K. (2018). Manganese oxide nanoparticle-induced changes in growth, redox reactions and elicitation of antioxidant metabolites in deadly nightshade (*Atropa belladonna* L.). *Industrial Crops and Products*, 126, 403-414

Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S.A., Rehman, H.U., Ashraf, I., Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the Total Environment*, 721, 137778.

Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.J., Kopittke, P.M. (2016). Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends in Plant Science*, 21(8), 699-712.

Wang, Y., Deng, C.Y., Cota-Ruiz, K., Peralta-Videa, J.R., Sun, Y.P., Rawat, S., Tan, W.J., Reyes, A., Hernandez-Viezcas, J.A., Niu, G.H. (2020). Improvement of nutrient elements and allicin content in green onion (*Allium fistulosum*) plants exposed to CuO nanoparticles. *Science of the Total Environment*, 725, 138387.

Wesolowska, A., Jadczyk, P., Kulpa, D., Przewodowski, W. (2019). Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis of essential oils from AgNPs and AuNPs elicited *Lavandula angustifolia* in vitro cultures. *Molecules*, 24, 606.

Woldeamanuel, K.M., Kurra, F.A., Roba, Y.T. (2021). A review on nanotechnology and its application in modern veterinary science. *International Journal of Nanomaterials, Nanotechnology and Nanomedicine* 7(1), 26-31.

Yadav, R.K., Singh, N.B., Singh, A., Yadav, V., Bano, C., Khare, S., Vegetas, N. (2020). Expanding the horizons of nanotechnology in agriculture: Recent advances, challenges and future perspectives. *Vegetos*, 33, 203-22.

Zaeem, A., Drouet, S., Anjum, S., Khursihs, R., Younas, M., Blondeau, J.P., Tungmunthum, D., Giglioli-Guivarc'h, N., Hano, C., Abbasi, B.H. (2020). Effects of biogenic zinc oxide nanoparticles on growth and oxidative stress response in flax seedlings vs. in vitro cultures: A comparative analysis. *Biomolecules*, 10, 918.

Zhao, X., Zhang, X., Gao, S., Shan, C. (2022). Cerium improves plant growth and fruit quality of strawberry plants under salt stress by changing the antioxidant capacity and water physiology. *Plant Soil Environ.* 68(11), 499-509.

**ASMADA KAOLİN UYGULAMALARININ ÜZÜMÜN TANE KOMPOZİSYONU ÜZERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Emine Sema ÇETİN

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 66100 Yozgat/TÜRKİYE
esema.cetin@yobu.edu.tr

ORCID: 0000-0001-7601-8491

Orhan YILMAZ

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 66100 Yozgat/TÜRKİYE

ORCID: 0009-0000-7692-0522

Berna KELES

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 66100 Yozgat/TÜRKİYE
berna.keles@yobu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-6723-283X

ÖZET

İklim krizi nedeniyle dünyamız gittikçe kuraklaşmakta ve kuraklığın şiddeti de her geçen gün artmaktadır. Son 20 yılda %29 seviyelerinde artış gösteren kuraklık sorunu tarım alanında da ciddi bir tehlike olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir taraftan kuraklığın getirdiği su kaynaklarının azalması ile birlikte bitkilerin su sıkıntısı yaşamaları, diğer taraftan artan ısı ile birlikte bitkilerde güneşin yakıcı etkisinin daha fazla hissedilmesi bitkilerde abiyotik ve biyotik strese neden olmaktadır. Ekosistemin vazgeçilmez bir parçası olan bitkileri bu durumdan korumak amacıyla yapılacak uygulamalar bu bakımdan önemlidir. Bitkiyi güneşten korumak, yakıcı etkisini azaltmak hem söz konusu streslerin önlenmesinde hem de stres kaynaklı verim ve kalite azalmasının önlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Bir kil minerali olan kaolin (Alüminyum Silikat, $Al_2O_3 \cdot Si_2$)'in uygulandığı yaprak yüzeyinden kızılötesi ve ultraviyole ışınlarını yansıtarak bitkilerde ışık ve ısı stresini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca farklı meyve ve sebzelerde yapılmış kaolin uygulamalarında, ürünlerin renk, toplam çözülebilir kuru madde, C vitamini ve antosiyanin değerleri üzerine de olumlu etkilerinin bulunduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Üzüm, içermiş olduğu çok değerli bileşenleri ile insan sağlığı ve beslenmesi bakımından önemli bir meyvedir. Bu araştırma ile de üç farklı dozda (%2,5; %5; %7,5) kaolin uygulanmış Michele Palieri üzüm çeşidinde tanelerdeki fenolik bileşikler, flavanoller, flavonoller ile gibberellik asit, zeatin, absisik asit ve salisilik asit miktarları incelenmiştir. Elde edilen bulgular doza göre değişmekle birlikte kaolinin bu amaçla kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Üzüm, kaolin, sıcaklık, hormon, fenolik

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF KAOLIN APPLICATIONS ON GRAPE BERRY
COMPOSITION IN GRAPEVINES**

ABSTRACT

Due to the climate crisis, our world is becoming increasingly arid, and the severity of drought is growing day by day. Drought, which has increased by 29% in the last 20 years, poses a serious threat to agriculture. On the one hand, the decrease in water resources due to drought causes plants to experience water scarcity; on the other hand, the increasing heat makes plants feel the scorching effect of the sun more intensely, leading to abiotic and biotic stress. Therefore, practices aimed at protecting plants, an indispensable part of the ecosystem, from this situation are crucial. Protecting plants from the sun and reducing its scorching effect is of great importance both in preventing these stresses and in preventing stress-related decreases in yield and quality. It has been determined that kaolin (Aluminum Silicate, $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Si}_2$), a clay mineral, reduces light and heat stress in plants by reflecting infrared and ultraviolet rays from the leaf surface where it is applied. Furthermore, studies have shown that kaolin applications on various fruits and vegetables have positive effects on the color, total soluble dry matter, vitamin C, and anthocyanin content of the products. Grapes, with their many valuable components, are an important fruit for human health and nutrition. In this research, the amounts of phenolic compounds, flavanols, gibberellic acid, zeatin, abscisic acid and salicylic acid in the berries of Michele Palieri grape variety treated with three different doses of kaolin (2.5%; 5%; 7.5%) were examined. The findings, although varying according to dose, indicate that kaolin has high potential for use for this purpose.

Keywords: Grape, kaolin, temperature, hormone, phenolic

1. Giriş

Günümüzde küresel ısınmanın da etkisi ile yakıcı sıcaklar her geçen gün kendisini daha fazla hissettirmektedir. Bitkiler gün boyunca bu sığağa maruz kalmakta, kendilerini korumak amacıyla stomalarını kapatmakta ve bu da net fotosentez oranının düşmesine neden olmakta ve bitki strese girmektedir (Xu ve Shen, 2005; Chamchaiyaporn vd., 2013). Bu nedenle bitkiyi güneşten korumak, hem streslerin önlenmesinde hem de verim ve kalite azalmasını önlemek bakımından önem taşımaktadır. Yaprak yüzeyine yansıtıcı bir materyalin uygulanmasının sıcaklığın azaltılmasında etkili olabileceği düşünülmüş, bu şekilde bir filmle kaplanan yaprakların radyasyonu yansıttığı, ısı ve ışık stresini azalttığı belirlenmiştir (Glenn ve Puterka, 2005; Dinis vd., 2016). Bu amaçla beyaz renkli bir kil minerali olan kaolin (Alüminyum Silikat, $Al_2O_3Si_2$) yaygın şekilde kullanılmaktadır (Ou vd., 2010). Kaolinin nar, elma, ceviz, turuncgiller ve domates gibi türlerde başarıyla uygulandığı belirlenmiştir (Boari vd., 2015; Cantore vd., 2009; Glenn, 2012; Pace vd., 2006; Saavedra Del vd., 2004; Weerakkody vd., 2010). Kaolinin çay bitkisinde bitki örtüsü sıcaklığını azalttığı (Anandacoomaraswamy vd., 2000), turuncgillerde net CO_2 asimilasyon oranını, stoma iletkenliğini ve su kullanım etkinliğini arttırdığı (Jifon ve Syvertsen, 2003) ve pıkan cevizinde (Lombardini vd., 2005) yaprak sıcaklığını düşürdüğü belirlenmiştir. Günümüzde kaolinin en yaygın kullanım amacı kısıtlı su durumunda bitkiyi korumaktır (Tubajika vd., 2007, Cantore vd., 2009; Glenn, 2012). Bazı çalışmalar, özellikle su stresi koşullarında kaolin uygulamasından sonra farklı kültür bitkilerinin veriminde artış olduğunu göstermiştir (Lapointe vd., 2006; Steiman vd., 2007; Cantore vd., 2009; Khaleghi vd., 2015).

Kaolinin ayrıca toplam suda çözülebilir kuru madde, C vitamini ve antosiyanin içeriğinde de artışa neden olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Glenn vd., 2001; Melgarejo vd., 2004; Wand vd., 2006; Yazici ve Kaynak, 2006; Chamchaiyaporn vd., 2013; Shellie ve King, 2013a). Elmada kırmızı rengin iyileşmesinde (Stanley, 1998), domateste meyve likopen içeriğinin artmasında etkili olduğu tespit edilmiştir (Saavedra Del vd., 2004; Pace vd., 2006).

Bitkilerde kaolinin etkisine yönelik çalışmalar yapılmış olup, asmada da bulunmaktadır. Bilindiği üzere asmalarda da yüksek sıcaklıklar üzüm taneleri üzerinde güneş yanığı problemlerinin ortaya çıkmasına ve kalitenin düşmesine neden olmaktadır (Gambetta vd., 2021). Bir araştırmada omcalara kaolin uygulaması yapılmış olup aynı zamanda su stresi uygulanmıştır. Araştırma sonucunda kaolinin su stresi altında yaprak ve salkımlarda doku sıcaklığını düşürdüğü belirlenmiştir (Shellie ve Glenn, 2008). Benzer şekilde kaolinin asmada ısı stresini azalttığına yönelik farklı çalışmalar da bulunmaktadır (Shellie ve King, 2013b; Brillante vd., 2016; Cataldo vd., 2022). Kaolinin çekirdeksiz üzümde renk ve kuruma randımanı üzerine etkisi incelenmiştir. Kaolin vejetasyon döneminde bir kez %5 (5 kg/100 L su) ve iki kez %2.5 (2.5 kg/100 L su) olacak şekilde toplam üç kez püskürtülerek uygulanmıştır. Araştırma sonucundaki kuru üzümde kaolinin tane yüzeylerinde kalıcılığını kaybettiğini dolayısıyla kalite kriterlerine olumsuz bir etkide bulunmadığını ortaya çıkarmıştır (Teker vd., 2023).

Üzüm içermiş olduğu bileşenleri ile insan sağlığı ve beslenmesi bakımından önemli bir meyvedir. Asmada sekonder metabolit birikimini artırmaya yönelik kaolin uygulaması ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma ile de kaolin uygulamalarının Michele Palieri üzüm çeşidinde tanelerdeki sekonder metabolitler, hormonlar, organik asitler ve aminoasit miktarları üzerine etkileri incelenecek olup, uygulamanın tane kompozisyonunu bu bileşenler yönüyle zenginleştirmesi amaçlanmaktadır. Farklı konsantrasyonlarda kaolin uygulanan üzümlerde bu bileşenlerin birikiminin yüksek olması üzümün biyokimyasal içeriğini artırmada kaolinin kullanım potansiyelini ortaya koyma bakımından bir gösterge durumundadır.

2. Materyal ve Yöntem

Araştırma, 2025-2026 yılları arasında yürütülmüştür. Uygulamalar Yozgat Merkez Köylerinden olan Recepli Köyü'nde 5 da arazi üzerine tesis edilmiş, 1103 Paulsen Amerikan asma anacı üzerine aşılanmış Michele Palieri üzüm çeşidinden oluşan 9 yaşındaki bağda yapılmıştır. Uygulamalar, çeşidin fenolojik gözlemleri baz alınarak tanelerin koruk safhasında, ben düşme döneminde ve hasattan 10 gün önce olacak şekilde 3 ayrı dönemde yapılmıştır. Kaolinde omcanın tümüyle ıslatılması önemli olup bu amaçla omcalar tümüyle kaplanmıştır (Lo Verde vd., 2011). Olgunlaşma döneminde salkım örnekleri alınmış, laboratuvara getirilmiş ve ekstraksiyon sürecine kadar derin dondurucuda bekletilmişlerdir.

Analizlerin bir kısmı Yozgat Bozok Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölüm Laboratuvarında, bir kısmı ise Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

2.1. Fenolik bileşik ekstraksiyonu: Ekstraksiyon işlemleri Caponio vd. (1999)'nin metoduna göre yapılmıştır. Elde edilen ekstrakt hem spektrofotometre hem de HPLC de fenolik bileşiklerin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Analizler 3 tekerrürlü olarak yapılmıştır.

2.2. Toplam fenolik bileşik analizi: Folin Ciocalteu kolorimetrik metodu kullanılarak Singleton ve Rossi (1965)'ye göre yapılmıştır. Toplam fenolik madde miktarları gallik asit eşdeğeri (Gallic Acid Equivalent, GAE) olarak belirlenmiştir.

2.3. Toplam flavonol analizi: Neu solusyonu kullanılarak Dai vd. (1995)'ne göre yapılmış, toplam flavonollerin miktarı, rutin standardından hazırlanmış olan körveden yararlanılarak, rutin eşdeğeri olarak (Rutin Equivalent, RE) mg/g şeklinde belirlenmiştir.

2.4. Toplam flavanol analizi: Arnous vd. (2001)'ne göre DMAC (dimetil amino sinnamaldehit) metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar kateşin standardından hazırlanmış olan körveden yararlanılarak, kateşin eşdeğeri (Catechin Equivalent, CE) (mg/g) cinsinden sunulmuştur.

2.5. Fenolik bileşiklerin ve bitkisel hormonların tanımlanması: HPLC ile gerçekleştirilmiştir. Fenolik bileşiklerin tanımlanmasında modifiye edilmiş Gomes vd. (1999)'nin metodu kullanılmıştır. Fenolik bileşikler içerisinde asmada ve üzümde en fazla bulunan gallik asit, 3,4-dihidroksi benzoik asit, klorojenik asit, 4-dihidroksi benzoik asit, 2,5- dihidroksi benzoik asit, vanilik asit, kafeik asit, epikateşin, p-kumarik asit, ferulik asit, rutin, ellajik asit, sinamik asit ve kuersetin ile resveratrol miktarları ile bitkisel hormonlardan gibberellik asit, zeatin, absisik asit ve salisilik asit olmak üzere hormonlar belirlenmiştir.

2.6. Verilerin değerlendirilmesi

Araştırma 3 tekerrürlü ve her tekrürde 5 omca olacak şekilde yürütülmüştür. Deneme sonunda elde edilen veriler tesadüf blokları deneme desenine göre SPSS 20 istatistik programında değerlendirilmiş, ortalamalar arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre belirlenmiştir ($p \leq 0,05$).

3. Bulgular ve Tartışma

Farklı dozlarda kaolin uygulamasının asmada sekonder metabolit üretimi üzerine etkisinin incelendiği bu çalışmada toplam fenolik bileşik ve toplam flavonol içeriği bakımından %7,5 kaolin uygulamasının etkili sonuçlar verdiği görülmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Spektrofotometrik olarak belirlenen fenolik bileşik miktarları

Kaolin (%)	Toplam fenolik madde (mg/g GAE)	Toplam flavonol (mg/g RE)	Toplam flavanol (mg/g CE)
Kontrol	2,440 c	0,020 d	0,053 a
2,5	3,199 b	0,059 c	0,056 a
5,0	3,586 b	0,085 b	0,062 a
7,5	5,584 a	0,102 a	0,026 b

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmaktadır ($p < 0,05$).

Toplam fenolik madde miktarı kontrol grubunda 2,440 mg/g GAE olarak belirlenmişken, kaolin dozu arttıkça doğrusal bir yükseliş göstermiş ve %7.5 kaolin uygulamasında istatistiksel olarak en yüksek seviyeye (5,584 mg/g GAE) ulaşmıştır. Benzer bir eğilim toplam flavonol içeriğinde de gözlenmiştir; kontrol grubunda 0,020 mg/g RE olan flavonol miktarı, %7.5 kaolin dozuyla yaklaşık 5 kat artarak 0,102 mg/g RE seviyesine çıkmıştır. Kaolin partikül filminin oluşturduğu beyaz tabaka, güneş ışığını yansıtarak bitki kanopisinde mikroklimatik bir değişim yaratmaktadır (Glenn ve Puterka, 2005). Normal

şartlarda aşırı sıcaklık ve UV stresi fenolik bileşiklerin sentezini baskılayabilir veya degradasyona neden olabilir. Ancak kaolin uygulaması, yaprak ve tane sıcaklığını optimum sınırlarda tutarak fenilpropanoid yolunun anahtar enzimi olan Fenilalanin Amonyak Liyaz (PAL) aktivitesini korumuş ve teşvik etmiş olabileceği düşünülmektedir. Flavonoller, bitkilerde güçlü UV filtreleri ve antioksidanlar olarak görev yapmaktadır. Kaolin dozunun artmasıyla flavanol miktarının çarpıcı şekilde yükselmesi, bitkinin değişen ışık kalitesine karşı gösterdiği fizyolojik bir adaptasyon ve sekonder metabolizma aktivasyonu olarak değerlendirilebilir. Buna karşılık, toplam flavanol miktarı incelendiğinde farklı bir seyir saptanmıştır. Kontrol (0,053 mg/g CE), %2.5 (0,056 mg/g CE) ve %5.0 (0,062 mg/g CE) kaolin uygulamaları arasında istatistiksel olarak bir fark bulunamazken, %7.5 kaolin uygulamasında flavanol miktarı sert bir düşüşle 0,026 mg/g CE seviyesine gerilemiştir. Bu durumun flavanollerin sentezinin doğrudan spesifik UV-B dalga boyları tarafından tetiklenmesinden, en yüksek dozda (%7.5) kanopi yüzeyinin yoğun şekilde kaolin ile kaplanması, yaprağa ulaşan spesifik ışık dalga boylarını değiştirerek flavanol sentezinden sorumlu genlerin ekspresyonunu düşürmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 2. HPLC ile belirlenen fenolik bileşik miktarları (ppm)

Kaolin (%)	Kateşin	Ellajik asit	Epikateşin	Gallik asit	3,4 dihidroksi benzoik asit	4-hidroksi benzoik asit	Kafeik asit	Naringin	Sinnamik asit	2,5dihidroksi benzoik asit	Vanilik asit	p-kumarik asit	Ferulik asit	Klorogenik asit	Rutin	Kuersetin	Resveratrol
Kontrol	1,98 9 b	123,562 d	21,85 7 c	0,02 2 ab	0,70 8 a	0,12 7 b	55,497 c	0,98 0 c	0,26 1 c	15,16 2 a	0,17 2 d	1,11 7 a	1,292 b	0,568 b	1,725 d	8,88 6 a	0,163 d
2,5	1,81 9 d	1071,00 9 c	13,31 0 d	0,02 0 b	0,58 4 b	5,26 9 a	46,582 d	1,14 6 b	0,57 6 a	7,093 b	0,31 3 c	0,63 1 b	14,49 3 a	20,09 5 a	365,44 1 a	2,66 4 b	0,245 c
5,0	2,14 4 a	1105,43 7 b	97,09 8 a	0,02 4 a	0,37 8 c	0,11 9 b	96,803 b	1,37 6 a	0,48 5 b	6,294 bc	0,44 5 a	0,01 6 c	0,705 c	0,543 b	46,111 c	1,87 9 c	16,17 3 b
7,5	1,88 9 c	1871,34 9 a	40,60 4 b	0,02 1 b	0,27 5 d	0,12 1 b	151,86 6 a	0,99 0 c	0,05 9 d	6,204 c	0,63 0 b	0,01 6 c	0,721 c	0,248 c	224,87 0 b	1,44 8 d	22,39 8 a

* Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmaktadır (p<0.05).

HPLC analizi ile örneklerin fenolik bileşikler içeriklerinde kaolin uygulamasına göre değişiklikler gözlemlendiği görülmektedir (Çizelge 2). Fenilpropanoid yolağının en kritik bileşiklerinden biri olan ellajik asit, kontrol grubunda 123,562 µg/g iken %7.5 kaolin uygulamasıyla yaklaşık 15 katlık çarpıcı bir artış göstererek 1871,349 µg/g seviyesine ulaşmıştır. Benzer şekilde, güçlü bir antioksidan ve hidroksisinnamik asit türevi olan kafeik asit, kontrol grubundaki 55,497 µg/g değerinden %7.5 dozunda 151,866 µg/g seviyesine yükselmiştir. Stilben yapısındaki antimikrobiyal ve antioksidan koruyucu olan ve asmada yüksek miktarlarda bulunduğu bilinen resveratrol ise kontrolde oldukça düşükken (0,163 µg/g), %7.5 kaolin ile maksimum seviyeye (22,398 µg/g) ulaşmıştır. Bu üç temel bileşikteki doğrusal ve güçlü artışlar, kaolin partikül filminin bitki kanopisinde yarattığı yansıtıcı mikroklima etkisinin, fenilpropanoid ana yolunu güçlü bir şekilde teşvik ettiğini ve bitkinin antioksidan kapasitesini en üst düzeye çıkardığını ortaya koymaktadır. Buna karşın, bazı bileşiklerin spesifik ara dozlarda pik yapması, kaolinin bitki fizyolojisinde doza bağımlı bir metabolik seyir izlediğini göstermektedir. Örneğin rutin,

kontrol grubunda oldukça düşük bir seviyede (1,725 µg/g), %2.5 kaolin dozuyla olağanüstü bir artış göstererek 365,441 µg/g değerine ulaşmış, ancak daha yüksek doz olan %5.0 de tekrar bir düşüş göstermiştir. Benzer bir eğilim klorogenik asit (20,095 µg/g) ve ferulik asit (14,493 µg/g) için de %2.5 dozunda gözlenmiştir. Düşük kaolin dozunun (%2.5), yaprak ve tane yüzeyinde hafif bir yansıtıcı bariyer oluşturarak bitkiyi spesifik bir ışık kalitesine maruz bıraktığı, bunun da doğrudan rutin ve klorogenik asit sentezleyen gen ekspresyonlarını maksimum düzeyde tetiklediği söylenebilir. Orta doz olan %5.0 kaolin uygulamasında ise kateşin (2,144 µg/g), epikateşin (97,098 µg/g) ve flavanon yapısındaki naringin (1,376 µg/g) en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Bu durum, %5.0 konsantrasyonun flavan yolunu (flavan-3-ol sentezi) optimize ettiğini göstermektedir. Dikkat çekici bir diğer bulgu ise kontrol grubunda yüksek olan bazı bileşiklerin kaolin uygulamalarıyla baskılanmasıdır. 3,4 dihidroksi benzoik asit, 2,5 dihidroksi benzoik asit, p-kumarik asit ve kuersetin en yüksek değerlerini kontrol grubunda göstermiş, kaolin dozlarının artmasıyla istatistiksel olarak anlamlı azalmalar göstermiştir. Özellikle kuersetinin kontrolde en yüksek (8,886 µg/g) olup kaolin uygulamalarıyla düşmesi, kaolinin yansıtıcı bariyeri sayesinde bitkinin doğrudan maruz kaldığı fotooksidatif güneş stresinin azalmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

Çizelge 3. HPLC ile belirlenen bitkisel hormon miktarları (ppm)

Kaolin (%)	Zeatin	Salisilik Asit	Gibberellik (GA ₃)	Asit	Indol (IAA)	Asetik	Asit	Absisik (ABA)	Asit
Kontrol	146,119 a	1,345 b	64,910 c		6,488 b			0,246 d	
2,5	95,025 c	1,067 c	33,663 d		5,849 c			14,862 a	
5,0	116,871 b	0,922 d	105,484 a		6,546 ab			7,342 c	
7,5	49,567 d	1,420 a	92,098 b		6,743 a			10,842 b	

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmaktadır (p<0.05).

Çizelge 3 incelendiğinde, asma bitkisine uygulanan farklı kaolin dozlarının içsel hormon (Zeatin, Salisilik Asit, GA₃, IAA ve ABA) seviyeleri üzerinde istatistiksel olarak son derece önemli ve dinamik etkiler yarattığı görülmektedir (p<0.05). Elde edilen bulgular, kaolin partikül filminin asmanın hem büyüme-gelişme performansını hem de abiyotik stres sinyal yollarını doza bağımlı olarak modüle ettiğini göstermektedir. Bitkilerde kuraklık, yüksek sıcaklık ve ışık stresinin en temel primer marker'ı Absisik Asit (ABA) hormonudur. Kontrol grubunda oldukça düşük (0,246 µg/g) olan ABA seviyesi, %2.5 kaolin uygulamasıyla ani ve çok sert bir yükseliş göstererek en yüksek seviyesine (14,862 µg/g) ulaşmış, %5.0 ve %7.5 dozlarında ise kademeli olarak (sırasıyla 7,342 ve 10,842 µg/g) azalmış ve dengelenmiştir. Düşük dozda (%2.5) görülen bu ani yükseliş bitkinin kaolin partikülleriyle temasında veya hafif mikroklimatik değişimde stomalarını kapatarak su dengesini korumaya yönelik gösterdiği ani bir erken uyarı yanıtı olarak yorumlanabilir. Yüksek dozlarda (%5.0 ve %7.5) ABA'nın kontrol grubunun üzerinde kalması, kaolinin bitkide terlemeyi optimize ettiğini göstermektedir. Buna karşılık, büyüme, hücre genişlemesi ve salkım/tane gelişimi için kritik olan Gibberellik Asit (GA₃), kontrol grubunda 64,910 µg/g iken, %5.0 kaolin dozuyla maksimum seviyesine (105,484 µg/g) ulaşmış ve %7.5 dozunda da yüksek seyrini (92,098 µg/g) korumuştur. Hücre bölünmesi ve apikal dominans ile ilişkili olan İndol Asetik Asit (IAA) de benzer şekilde en yüksek değerine (%7.5 dozunda 6,743 µg/g) ulaşmıştır. Glenn ve Puterka (2005) tarafından belirtildiği üzere, kaolin uygulamaları aşırı kanopi

sıcaklığını düşürerek bitkiyi termal şoktan korumaktadır. Kontrol grubundaki asmalarda yüksek sıcaklık stresi GA₃ ve IAA gibi büyüme hormonlarının yıkımına yol açarken, %5.0 ve %7.5 kaolin dozları mikroklimayı optimize ederek bu büyüme hormonlarının kararlılığını ve sentezini güçlü bir şekilde teşvik etmiştir. Hücre bölünmesi ve yaşlanmayı geciktirme etkisi olan bir sitokinin türevi zeatin ise en yüksek değerini kontrol grubunda (146,119 µg/g) almış, artan kaolin dozlarıyla birlikte özellikle %7.5 dozunda 49,567 µg/g'a düşerek azalma eğilimi göstermiştir. Zeatin miktarındaki bu düşüş, kaolinin ışık yansıtma özelliği nedeniyle kanopideki mavi/kırmızı ışık kalitesini değiştirmesinden ve bitkinin büyüme enerjisini sitokinin tabanlı hücre bölünmesinden çok GA₃ ve IAA tabanlı hücre genişlemesine ve sekonder metabolit sentezine kaydırmasından kaynaklanabilir. Bitki savunma sistemlerinin ve sistemik kazanılmış direncin (SAR) anahtar hormonu olan Salisilik Asit (SA) incelendiğinde, en yüksek değerine %7.5 kaolin dozuyla (1,420 µg/g) ulaştığı görülmektedir. Salisilik asit, bitkinin abiyotik streslere karşı antioksidan enzim sistemlerini aktive eden bir sinyal molekül olup, %7,5 dozunda en yüksek değere ulaşan ellajik asit, kafeik asit ve resveratrol gibi güçlü savunma bileşiklerinin artışı, bu dozda salisilik asit (SA) sentezinin maksimuma çıkmasıyla tamamen örtüşmektedir. SA sinyal yolağının tetiklenmesi, fenilpropanoid metabolizmasını doğrudan yukarı yönlü hareket ettirdiğini düşündürmektedir.

4. Sonuç

Bu araştırma ile üzüm tanesinin bileşimindeki sekonder metabolitlerin kaolin uygulamaları ile artırılması amaçlanmış olup elde edilen veriler kaolinin üzümde özellikle bazı sekonder metabolitleri artırma yönünde etkili olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla üzümde tane kompozisyonunda bulunan ve insan sağlığı üzerine de önemli etkileri olduğu bilinen bileşenlerin bu uygulamalarla artırılabilme potansiyeli bulunmaktadır. Bu şekilde besin değeri yüksek olduğu bilinen, bitki ekstraktları içerisinde fazlaca yer verilen bir ürünün içeriği son derece doğal bir uygulama ile zenginleştirilebilecektir. Benzer şekilde bir fitoaleksinin olan, üzümde fazla miktarda bulunduğu bilinen ve insan sağlığı üzerinde başta kanser ve kalp hastalıkları olmak üzere pek çok etkisi bulunan resveratrol bileşiğinin miktarının da bu şekilde artırılması mümkündür.

Araştırmada aynı zamanda bitki hormonları da incelenmiş olup, bitkinin doğal savunma mekanizmasında da etkin rol oynadıkları bilinen özellikle absizik asit gibi hormonların miktarında da kaolin uygulaması ile artış görülmüş olup bu durum bitkinin biyotik ve abiyotik streslere olan direncinin de bir göstergesidir.

Kaynaklar

Aktaş, A. H., Şen, S., Yilmazer, M., Çubuk, E. (2005). Determination of Carboxylic Acids in Apple Juice by RP HPLC, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 24(1), 1-6.

Aly, M., Abd El-Megeed, N., Awad, R.M. (2010). Reflective particle films affected on, sunburn, yield, mineral composition and fruit maturity of 'Anna' apple (*Malus domestica*) trees. *Research J. of Agr. and Biological Sciences* 6(1):84-92.

Anandacoomaraswamy, A., De Costa, W.A.J.M., Shyamalie, H.W., Campbell, G.S. (2000). Factors controlling transpiration of mature field-grown tea and its relationship with yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(4), 375-386.

Arnous, A., Makris, D.P., Kefalas, P. (2001). Effect of principal polyphenolic components in relation to antioxidant characteristics of aged red wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 12, 5736-5742.

Azizi, A., Hokmabadi, H., Piri, S., Rabiei, V. (2013). Effect of kaolin application on water stress in pistachio cv. 'Ohadi'. *Journal of Nuts*, 9, 14.

Boari, F., Donadio, A., Schiattone, M.I., Cantore V. (2015). Particle film technology: a supplemental tool to save water. *Agricultural Water Management* (doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.014) 147: 154-162.

Brillante, L., Belfiore, N., Gaiotti, F., Lovat, L., Sansone, L., Poni, S., Tomasi, D. (2016). Comparing kaolin and pinolene to improve sustainable grapevine production during drought". *PLoS One* (doi.org/10.1371/journal.pone.0156631) 11(6):1-19

Cantore, V., Pace, B., Albrizio, R. (2009). Kaolin-based particle film technology affects tomato physiology, yield and quality. *Environmental and Experimental Botany*, 66(2), 279-288.

- Caponio, F., Alloggio V., Gomes, T. (1999). Phenolic compounds of virgin olive oil: Influence of paste preparation techniques. *Food Chemistry*, 64, 203-209.
- Cataldo, E., Fucile, M., Mattii, G.B. (2022). Effects of kaolin and shading net on the ecophysiology and berry composition of Sauvignon Blanc grapevines. *Agriculture* 12(4):491.
- Chamchaiyaporn, T., Jutamanee, K., Kasemsap, P., Vaithanomsat, P., Henpitak, C. (2013). Effects of kaolin clay coating on mango leaf gas exchange, fruit yield and quality. *Kasetsart Journal-Natural Science*, 47, 479-491.
- Creamer, R., Sanogo, S., El-Sebai, O. A., Carpenter, J., Sanderson, R. (2005). Kaolin-based foliar reflectant affects physiology and incidence of beet curly top virus but not yield of chile pepper. *Hort Science*, 40(3), 574-576.
- Dai, G.H., Andary, C., Mondolot, L., Boubals, D. (1995). Involment of phenolic compounds in the resistance of grapevine callus to Downy mildew (*Plasmopara viticola*). *European Journal of Plant Pathology*, 101, 541-547.
- Dinis, L. T., Ferreira, H., Pinto, G., Bernardo, S., Correia, C. M., Moutinho-Pereira, J. (2016). Kaolin-based, foliar reflective film protects photosystem II structure and function in grape vine leave sex posed to heat and high solar radiation. *Photosynthetica*, 54(1), 47-55.
- Ebeling, W. (1971). Sorptive dusts for pest control. *Annual Review of Entomology*, 16(1), 123-158.
- El-Khawaga, A.S., Mansour, A.E.M. 2014. Enhancing the efficiency of irrigation water use by using some antitranspirants in wonderful pomegranate orchards. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 3(3), 694-700.
- Gambetta, J.M., Holzapfel, B.P., Stoll, M., Friedel, M. (2021). Sunburn in grapes: a review. *Frontiers in Plant Science* (doi.org/10.3389/fpls.2020.604691), 11, 2123.
- Glenn, D. M. (2012). The mechanisms of plant stress mitigation by kaolin-based particle films and applications in horticultural and agricultural crops. *Hort Science*, 47(6), 710-711.
- Glenn, D.M., Puterka, G.J., Drake, S.R., Unruh, T.R., Knight, A.L., Baherle, P., Baugher, T.A. (2001). Particle film application influences apple leaf physiology, fruit yield, and fruit quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(2), 175-181.
- Glenn, D.M., Prado, E., Erez, A., McFerson, J., Puterka, G.J. (2002). A reflective, processed-kaolin particle film affects fruit temperature, radiation reflection, and solar injury in apple. *Journal of the American Society for Hort. Sci.* (doi.org/10.21273/jashs.127.2.188) 127(2):188-193.
- Glenn, D.M., Erez, A., Puterka, G.J., Gundrum, P. (2003). Particle films affect carbon assimilation and yield in Empire'apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 356-362.
- Glenn, D.M., Puterka, G.J. (2005). A new tool for agriculture: particle film technology. *Acta Horticulture Proceedings. Hort. Review*, 31:1-45.
- Goldschmidt, E.E. (1999). Carbohydrate supply as a critical factor for citrus fruit development and productivity. *Hort Science*, 34(6), 1020-1024.
- Gomes, T., Caponio, F., Alloggio, V. (1999). Phenolic compounds of virgin olive oil influence of paste preparation techniques. *Food Chemistry*, 64, 203-209.
- Javan, M., Tajbakhsh, M., Mandoulakani, B. A. (2013). Effect of antitranspirants application on yield and yield components in soybean (*Glycine max* L.) underlimited irrigation. *Journal of Applied Biological Sciences*, (1), 70-74.
- Jifon, J. L., Syvertsen, J. P. (2003). Kaolin particle film applications can increase photosynthesis and water use efficiency of ruby red'grapefruit leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(1), 107-112.
- Karise, R., Muljar, R., Smagghe, G., Kaart, T., Kuusik, A., Dreyersdorff, G., Mänd, M. (2016). Sublethal effects of kaolin and the biopesticides Prestop-Mixand Botani Gard on metabolic rate, water loss and longevity in bumblebees (*Bombus terrestris*). *Journal of Pest Science*, 89(1), 171-178.
- Khaleghi, E., Arzani, K., Moallemi, N., Barzegar, M. (2015). The efficacy of kaolin particle film on oil quality indices of olive trees (*Olea europaea* L.) cv. 'Zard'grown underwarmand semi-arid region of Iran. *Food Chemistry*, 166, 35-41.
- Köse, S., Kaklıkkaya, N., Koral, S., Tufan, B., Buruk, K.C., Aydın, F. (2011). Commercial test kits and the determination of histamine in traditional (Ethnic) fish products-evaluation against an EU accepted HPLC method. *Food Chemistry*, 125 (4), 1490-1497.

- Lapointe, S.L., McKenzie, C.L., Hall, D.G. (2006). Reduced oviposition by *Diaprepes abbreviatus* (Coleoptera: Curculionidae) and growth enhancement of citrus by surround particle film. *Journal of Economic Entomology*, 99(1), 109-116.
- Lombardini, L., Harris, M.K., Glenn, D.M. (2005). Effects of particle film application on leaf gas exchange, water relations, nut yield, and insect populations in mature pecan trees. *Hort Science*, 40(5), 1376-1380.
- Lo Verde, G., Caleca, V., Lo Verde, V. (2011). The use of kaolin to control *Ceratitis capitata* in organic citrus groves. *Bulletin of Insectology*, 64(1), 127-134.
- Mahmoudian, M., Rahemi, M., Karimi, S., Yazdani, N., Tajdini, Z., Sarikhani, S., Vahdati, K. (2021). Role of kaolin on drought tolerance and nut quality of Persian walnut. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 20(6):409-416.
- Melgarejo, P., Martinez, J.J., Hernandez, F.C.A., Martinez-Font, R., Barrows, P., Erez, A. (2004). Kaolin treatment to reduce pomegranate sunburn. *Sci. Hort.* (doi.org/10.1016/j.scienta.2003.09.006) 100(1-4):349-353.
- Ou, C., Du, X., Shellie, K., Ross, C., Qian, M.C. (2010). Volatile compounds and sensory attributes of wine from cv. Merlot (*Vitis vinifera* L.) grown under differential levels of water deficit with or without a kaolin-based, foliar reflectant particle film. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(24), 12890-12898.
- Pace, B., Boari, F., Cantore, V., Leo, L., Vanadia, S., De Palma, E., Phillips, N. (2006). Effect of particle film technology on temperature, yield and quality of processing tomato. In *X International Symposium on the Processing Tomato* 758 (pp. 287-294).
- Saavedra Del, R.G., Escaff, G.M., Hernández, V.J. (2004). Kaolin effects in processing tomato production in Chile. In *IX International Symposium on the Processing Tomato* 724 (pp. 191-198).
- Sevilmiş, D., Bilgili, M.E., Barut, H., Seydoşoğlu, S., Sevilmiş, D. (2019). Yapıktan uygulanan kaolinin ışık sıcaklık ve biyotik strese etkisi. *UAZİMDER Uluslararası Anadolu Ziraat Mühendisliği Bilimleri Dergisi*. 3, 27-3.
- Shellie, K. C., King, B. A., (2013a). Kaolin particle film and water deficit influence red wine grape color under high solar radiation in an arid climate. *American Journal of Enology and Viticulture*, 64, 214-222.
- Shellie, K.C., King, B.A. (2013b). Kaolin particle film and water deficit influence Malbec leaf and berry temperature, pigments, and photosynthesis. *American Journal Enology and Viticulture* 64(2):223-230.
- Shellie, K., Glenn, D.M. (2008). Wine grape response to foliar particle film under differing levels of preveraison water stress. *Hort Science*, 43(5), 1392-1397.
- Singleton, V.L., Rossi, J.R. (1965). Colorimetry of Total Phenolics With Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid". *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144-158.
- Stanley, D. (1998). Particlefilms a new kind of plant protectant. *Agricultural Research*, 46(11), 16.
- Steiman, S.R., Bittenbender, H.C., Idol, T.W. (2007). Analysis of kaolin particle film use and its application on coffee. *Hort Science*, 42(7), 1605-1608.
- Teker, T., Candemir, A., Doğan, P. (2023). Bağcılıkta kaolin (surround wp) uygulamasının çekirdeksiz kuru üzüm renk ve kuruma randımanı üzerine etkisi. *Bahçe 52 (Özel Sayı 1)*: 391-395.
- Thomas, A.L., Muller, M.E., Dodson, B.R., Ellersieck, M.R., Kaps, M. (2004). A kaolin-based particle film suppresses certain insect and fungal pests while reducing heat stress in apples. *Journal of the American Pomological Society*, 58(1), 42.
- Tubajika, K.M., Civerolo, E.L., Puterka, G.J., Hashim, J.M., Luvisi, D.A. (2007). The effects of kaolin, harpin, and imidacloprid on development of Pierce's disease in grape. *Crop Protection*, 26(2), 92-99.
- Wand, S., Theron, K., Ackerman, J., Marais, S. (2006). Harvest and post-harvest apple fruit quality following applications of kaolin particle film in south African orchards. *Sci. Hort.* 107:271-276 (doi:10.1016/j.scienta.2005.11.002).
- Weerakkody, P., Jobling, J., Infante, M.M.V., Rogers, G. (2010). The effect of maturity, sun burn and the application of sun screens on the internal and external qualities of pomegranate fruit grown in Australia. *Scientia Horticulturae*, 124(1), 57-61.

Wisniewski, M., Glenn, D.M., Fuller, M.P. (2002). Use of a hydrophobicparticle film as a barrier to extrinsicice nucleation in toma toplants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(3), 358-364.

Xu, D.Q., Shen, Y.K. (2005). External and internal factors responsible for midday depression of photosynthesis. *Handbook of Photosynthesis*, 2, 287-297.

Yamada, M., Fukumachi, H., Hidaka, T. (1996). Photosynthesis in longan and mango as influenced by high temperature sunder high irradiance. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 64(4), 749-756.

Yazici, K., Kaynak, L. (2006). Effects of kaolin and shading treatments on sun burn on fruit of Hicaznar cultivar of pomegranate (*Punica granatum* L. cv. Hicaznar). *In I International Symposium on Pomegranate and Minor Mediterranean Fruits* 818 (pp. 167-174).

**RESEARCH ON THE BIOLOGICAL ACTIVITIES OF THE *HUMULUS LUPULUS* PLANT:
A COMPREHENSIVE REVIEW**

Dr. Öğr. Üyesi Hatice BEKÇİ

Kayseri University, Develi Hüseyin Şahin Vocational School, Department of Horticulture, Kayseri-
Türkiye

Email: haticebekci@kayseri.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3268-709X>

Abstract

Humulus lupulus L. (hop), a perennial climbing plant belonging to the *Cannabaceae* family, has long been recognized for its essential role in the brewing industry. However, beyond its commercial utility as a flavoring and stabilizing agent, *H. lupulus* possesses a complex secondary metabolite profile with significant therapeutic potential. This review synthesizes the current literature regarding the phytochemistry and biological activities of hops, focusing on their antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory, and cytotoxic properties. Special attention is given to the bioactive polyphenols, including prenylated flavonoids (xanthohumol, 8-prenylnaringenin) and bitter acids (α ve β acids), mapping their mechanisms of action against various pathological targets.

Keywords: *Humulus lupulus*, biologic activity, antiinflamatuvar

1. Introduction

Historically rooted in traditional medicine, *Humulus lupulus* has been utilized for centuries to alleviate insomnia, anxiety, and various digestive disorders (Zanoli and Zavatti, 2008). In recent decades, pharmacognostic interest in this species has surged. This shift is largely driven by the successful isolation of structurally unique secondary metabolites concentrated within the lupulin glands of the female inflorescences, commonly known as hop cones (Karabın et al., 2016). The broad therapeutic versatility exhibited by *H. lupulus* is fundamentally anchored in three distinct chemical classes (Stevens et al., 1997; Almaguer et al., 2014):

- Bitter Acids: Categorized into humulones (α -acids) and lupulones (β -acids).
- Prenylated Flavonoids: Most notably xanthohumol (XN), isoxanthohumol (IXN), and 8-prenylnaringenin (8-PN)—the latter recognized as one of the most potent phytoestrogens discovered to date.
- Essential Oils: Predominantly composed of volatile terpenes such as myrcene, humulene, and caryophyllene.

Deciphering both the isolated pharmacological pathways and the potential synergistic interactions of these fractions remains a critical frontier for developing targeted phytotherapeutic interventions, particularly within oncology, immunology, and metabolic health (Gerhäuser, 2005).

2. Phytochemical Profile

The ultimate biological efficacy of any *H. lupulus* derivative is inherently tied to the extraction methodologies employed and the specific fractions isolated. Xanthohumol, the most abundant prenylated chalcone found within the plant matrix, serves as the primary structural precursor to the highly bioactive flavanone 8-prenylnaringenin (Stevens and Page, 2004).

This biochemical transformation readily occurs via thermal isomerization during industrial processing, such as the wort-boiling stage in brewing. Intriguingly, it can also proceed *in vivo* through metabolic processing driven by human intestinal microbiota and hepatic cytochrome P450 enzymes—specifically the CYP1A2 isoform (Nikolic et al., 2005; Possemiers et al., 2006). Conversely, while bitter acids demonstrate distinct thermal instability by converting into iso- α -acids during processing, they maintain structural integrity and exhibit profound, independent bioactivities when successfully preserved within lipophilic organic extracts (Almaguer et al., 2014; Karabın et al., 2016).

3. Evaluated Biological Activities: Extended Literature and Mechanistic Analysis

3.1. Cytotoxic and Anticancer Efficacy

The cytotoxic potential of *Humulus lupulus* extracts represents one of the most rapidly evolving domains in modern cancer chemoprevention and oncology. Current literature centers heavily on the therapeutic mechanisms of xanthohumol (XN) and its primary metabolite, 8-prenylnaringenin (8-PN). When evaluated against highly proliferative human breast carcinoma models—specifically the estrogen receptor-positive (ER+) MCF-7 line and the triple-negative MDA-MB-231 line—XN consistently demonstrates potent, dose- and time-dependent antiproliferative properties (Delmulle et al., 2006). Mechanistic profiling reveals that this cytotoxicity extends beyond basic cell metabolic slowing; it actively drives programmed cell death (apoptosis). XN directly alters the mitochondrial membrane potential by downregulating anti-apoptotic markers (Bcl-2 and Bcl-X_L) while simultaneously upregulating pro-apoptotic Bax. This critical shift triggers the executioner caspase cascade, specifically activating caspase-3 and caspase-9 (Gerhäuser et al., 2002).

Beyond apoptosis induction, flow cytometry analyses demonstrate that hop-derived phenolics arrest the cell cycle at either the G₁/S or G₂/M transitions, effectively freezing uncontrolled cellular replication (Karabın et al., 2016). Furthermore, the complex process of angiogenesis—vital for solid tumor growth and subsequent metastasis—is highly sensitive to *H. lupulus* intervention. XN has been shown to suppress vascular endothelial growth factor (VEGF) and inhibit the nuclear factor-kappa B (NF- κ B) signaling pathway, effectively starving the tumor microenvironment of necessary neovascularization (Gerhäuser et al., 2002). Notably, recent studies indicate that 8-PN, through its strong affinity for estrogen receptors, can modulate receptor dynamics in ER+ lines, offering a multi-targeted approach to hormone-dependent cancers (Delmulle et al., 2006; Karabın et al., 2016).

3.2. Antioxidant and Radical Scavenging Mechanisms

Chronic oxidative stress, fueled by the accumulation of reactive oxygen species (ROS), is a notorious driver of macromolecular damage to cellular DNA, lipids, and proteins, thereby acting as a

catalyst for carcinogenesis and chronic systemic diseases. The polyphenolic architecture of *H. lupulus* combats this threat through a sophisticated, dual-action defense system (Tronina et al., 2020).

- **Direct Scavenging Pathway:** Utilizing their specific phenolic hydroxyl groups and lipophilic prenyl side-chains, hop extracts function as highly efficient electron or hydrogen donors. This chemical structure allows them to rapidly intercept, hydrate, and neutralize stable free radicals such as DPPH and ABTS⁺ (Tronina et al., 2020).
- **Indirect Cellular Pathway:** Intracellular assays indicate that these compounds do not merely act as passive chemical antioxidants; they actively upregulate endogenous cellular defenses. Hop phenolics stimulate the Nrf2 (Nuclear factor erythroid 2-related factor 2) signaling cascade (Karabín et al., 2016). Upon activation, Nrf2 translocates to the nucleus, binding to Antioxidant Response Elements (ARE) to launch the transcription of vital Phase II detoxification and antioxidant enzymes. This includes superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPx), and heme oxygenase-1 (HO-1), drastically lowering intracellular ROS accumulation and reinforcing overall cellular homeostasis (Karabín et al., 2016; Tronina et al., 2020).

3.3. Antimicrobial and Anti-inflammatory Properties

The bitter acids α -humulones and β -lupulon-rich fractions) synthesized within the hop cone function as the plant's natural immunological barrier, doubling as highly effective antimicrobial agents. Compelling peer-reviewed data demonstrates their pronounced inhibitory action against challenging Gram-positive pathogens, including *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, and clinically resistant Methicillin-Resistant *S. aureus* (MRSA) strains (Bogdanova et al., 2018). From a mechanistic perspective, the highly hydrophobic nature of these bitter acids allows them to seamlessly penetrate the lipophilic cytoplasmic membrane of Gram-positive bacteria. This disruption causes an immediate leak of protons across the cell wall, causing intracellular acidification and a collapse of the transmembrane electrical potential. This process severely drains cellular energy by halting ATP synthesis, culminating in bacterial cell death (Bogdanova et al., 2018). Conversely, because the outer membrane of Gram-negative bacteria presents a highly hydrophilic lipopolysaccharide barrier, hop acids display significantly lower efficacy against these organisms. On the anti-inflammatory front, *H. lupulus* fractions show excellent efficacy in mitigating chronic inflammatory cascades. In macrophage models (such as LPS-stimulated RAW 264.7 cells), both hop polyphenols and bitter acids block the nuclear translocation of NF- κ B (Van Cleemput et al., 2009). This targeted inhibition downregulates the transcription of inducible nitric oxide synthase (iNOS) and cyclooxygenase-2 (COX-2), leading to a drastic drop in the synthesis of pro-inflammatory mediators like nitric oxide (NO) and prostaglandin E₂ (PGE₂). Simultaneously, the production of key upstream pro-inflammatory cytokines—namely tumor necrosis factor- α (TNF- α), interleukin-1 beta (IL-1 β), and interleukin-6 (IL-6) is significantly suppressed, offering a powerful molecular framework for managing inflammatory pathologies (Van Cleemput et al., 2009; Karabín et al., 2016).

4. Methodological Considerations for Future Research

While current in vitro data regarding *H. lupulus* compounds is exceptionally promising, translating these findings to viable in vivo and clinical models presents several stark, methodological hurdles that the scientific community must address:

- **Bioavailability and Clearance:** Prenylated flavonoids, particularly xanthohumol, suffer from low metabolic bioavailability. This is primarily due to rapid intestinal clearance, phase II conjugation reactions, and low aqueous solubility, which severely restrict the systemic concentrations achievable via traditional oral administration routes.
- **Extract Standardization:** Significant fluctuations in the chemical profiles of raw hop extracts—driven by cultivar variations, climate conditions, and extraction solvents—demand much more stringent standardization protocols. Establishing fixed ratios of active chemical markers (α -acids relative to specific prenylflavonoids) is essential to ensure reproducible experimental and clinical outcomes.
- **Advanced Mechanistic Profiling:** To completely map the precise molecular pathways involved, future research must move away from over-relying on basic colorimetric cell-viability assays

(such as standard MTT assays). Studies should prioritize comprehensive deep-profiling methodologies, including multi-color flow cytometry, Western blotting, multiplex ELISA, and real-time qPCR.

5. Conclusion

Humulus lupulus represents a biochemically rich plant matrix whose therapeutic horizons extend far beyond its conventional use in the brewing industry. Its unique blend of prenylated phenolics and bitter acids displays highly compelling cytotoxic, antioxidant, and anti-inflammatory attributes. To unlock the full clinical potential of this traditional botanical, future investigations must prioritize clarifying clinical pharmacokinetics, engineering targeted delivery vehicles (such as nano-encapsulation or lipid-based carriers), and mapping the intricate synergistic interactions that occur within complex whole-plant fractions.

References

- Almaguer, Z., Sullivan, M. T., de Cooman, L., & de Keukeleire, D. (2014). *Hops (Humulus lupulus L.) in brewing and healthcare: a review of chemical constituents and biological activities*. Journal of the Institute of Brewing, 120(4), 289-314.
- Bogdanova, K., Rödl, M., Přistoupilová, H., Lipový, B., Barrett, J., & Kolář, M. (2018). *Antibacterial activity of hop extracts and their main components against Gram-positive pathogens*. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 73(10), 2735-2743.
- Delmulle, L., Vanden Berghe, T., Keukeleire, D. D., & Vandenabeele, P. (2006). *Flavonoids of hops (Humulus lupulus L.) induce apoptosis in MCF-7 human breast cancer cells*. Phytotherapy Research, 20(5), 374-378.
- Gerhäuser, C. (2005). *Beer constituents as potential cancer chemopreventive agents*. European Journal of Cancer, 41(13), 1941-1954.
- Gerhäuser, C., Alt, A., Heiss, E., Gamal-Eldeen, A., Klimo, K., Knauf, J., ... & Frank, N. (2002). *Mechanism-based cancer chemopreventive activity of xanthohumol, a prenylated chalcone from hops (Humulus lupulus)*. Molecular Cancer Therapeutics, 1(11), 959-969.
- Karabín, M., Hudcová, T., Jelínek, L., & Dostálek, P. (2016). *Biologically active compounds from hops and their relevance to human health: a review*. Biotechnology Advances, 34(1), 35-47.
- Nikolic, D., Li, Y., Chadwick, L. R., van Breemen, R. B. (2005). *In vitro metabolism of xanthohumol by human liver microsomes*. Drug Metabolism and Disposition, 33(10), 1432-1440.
- Possemiers, S., Bolca, S., Grootaert, C., Bruyneel, R., de Keukeleire, D., & Van de Wiele, T. (2006). *The intestinal microflora metabolizes the hops chalcone isoxanthohumol into the powerful phytoestrogen 8-prenylnaringenin*. Journal of Nutrition, 136(7), 1862-1867.
- Stevens, J. F., & Page, J. E. (2004). *Xanthohumol and related prenylflavonoids from hops and beer: to your health!* Phytochemistry, 65(10), 1317-1330.
- Stevens, J. F., Ivancic, M., Hsu, V. L., & Deinzer, M. L. (1997). *Prenylflavonoids from Humulus lupulus*. Phytochemistry, 44(8), 1575-1585.
- Tronina, T., Popłoński, J., & Huszcza, E. (2020). *Advances in modifying hop flavonoids to increase their bioactivity and bioavailability*. Molecules, 25(16), 3608.
- Van Cleemput, M., Cattoor, K., De Bosscher, K., Haegeman, G., De Keukeleire, D., & Heyerick, A. (2009). *Hop (Humulus lupulus)-derived bitter acids as multipotent bioactive compounds: COX-2, NF-κB, and Proinflammatory cytokine inhibition*. Journal of Natural Products, 72(6), 1006-1010.
- Zanoli, P., & Zavatti, M. (2008). *Pharmacognostic and pharmacological profile of Humulus lupulus L.* Journal of Ethnopharmacology, 116(3), 383-396.

**A FACILE AND EFFICIENT SYNTHETIC STRATEGY FOR PHTHALOCYANINES:
SYNTHESIS, OPTICAL PROPERTIES, AND STRUCTURE-PROPERTY RELATIONSHIPS**

Doç. Dr. Ebru Yabaş

¹Advanced Technology Application and Research Center, Sivas Cumhuriyet University, 58140 Sivas,
Türkiye

²Chemex Science R&D Joint Stock Company, 58140, Sivas, Türkiye

Email: eyabas@cumhuriyet.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7163-3057>

Abstract

Phthalocyanines (Pcs) are among the most extensively studied macrocyclic compounds due to their excellent thermal and chemical stability, strong absorption in the visible and near-infrared regions, and tunable electronic structures. These outstanding properties make them attractive materials for a wide range of applications, including chemical sensors, photocatalysis, photovoltaic systems, optoelectronic devices, photodynamic therapy, and energy storage technologies. However, conventional synthetic methods for phthalocyanines generally require high-boiling solvents, prolonged reaction times, and laborious purification procedures, which increase production costs and limit their industrial scalability. In this study, a rapid, simple, and environmentally friendly solvent-free solid-state synthetic strategy for the preparation of phthalocyanines is presented. Through a cyclotetramerization reaction carried out in the presence of a suitable base, both metal-free and metallophthalocyanines were successfully synthesized within approximately 10 minutes. Compared with conventional synthetic approaches, the proposed method significantly reduces the reaction time, eliminates the use of organic solvents, and provides a more sustainable route for phthalocyanine production. The structural and optical characterization of the synthesized phthalocyanines was carried out using Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy, Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry (MALDI-TOF MS), and UV-Visible spectroscopy. The spectroscopic analyses confirmed the successful formation of the macrocyclic phthalocyanine framework, while the characteristic Q and B absorption bands observed in the UV-Visible spectra demonstrated the optical properties of the synthesized compounds. The obtained results demonstrate that the developed solvent-free synthetic approach not only provides a rapid and efficient route for phthalocyanine synthesis but also represents an effective and sustainable alternative for the development of functional phthalocyanine derivatives for various technological applications. This study contributes to the environmentally friendly, cost-effective, and scalable synthesis of phthalocyanines, providing a promising foundation for their future applications in optoelectronics, sensing, and energy technologies.

Keywords: Phthalocyanine, solvent-free synthesis, solid-state synthesis, green chemistry.

1. Introduction

Phthalocyanines occupy a distinctive position among organic functional materials because of their extended π -electron systems, high chemical and thermal stability, and the possibility of modifying their molecular structures for different purposes. Initially used mainly in the production of blue and green pigments, these compounds have gradually evolved into multifunctional molecular systems whose optical, electronic, catalytic, and biomedical properties have been extensively investigated. Today, phthalocyanines are employed in sensors, catalysts, photovoltaic cells, organic semiconductors, photodynamic therapy systems, nonlinear optical materials, and energy-conversion technologies. This wide range of applications arises not only from the stable structure of the phthalocyanine macrocycle but also from the ability to control the central metal ion, peripheral substituents, and intermolecular interactions (de la Torre et al., 2007; McKeown, 1998; Zanotti et al., 2024).

The phthalocyanine macrocycle consists of four isoindole units linked through aza bridges. The central cavity of the molecule has a suitable geometry for coordinating two hydrogen atoms as well as a wide variety of metal and metalloid ions. In metal-free phthalocyanines, two hydrogen atoms occupy the central cavity, whereas their replacement by a metal ion leads to the formation of metallophthalocyanines. The identity, oxidation state, and coordination environment of the central metal ion can determine the electronic structure, redox properties, magnetic behavior, optical transitions, and photochemical activity of the resulting compound. Therefore, the properties of phthalocyanines sharing the same fundamental macrocyclic framework can differ considerably through variation of the central ion alone (McKeown, 1998; Sorokin, 2013).

Many of the characteristic properties of phthalocyanines originate from the aromatic 18 π -electron system delocalized over the macrocycle. This two-dimensional and largely planar conjugated structure results in high molar absorption coefficients and distinct electronic transitions in the visible region. UV–Visible spectra of phthalocyanines generally display two major absorption regions. The higher-energy band observed at approximately 300–400 nm is referred to as the B or Soret band, whereas the more intense transition generally occurring in the 600–750 nm region is known as the Q band. The position, intensity, and spectral profile of the Q band may vary depending on the central metal ion, substituents on the macrocycle, molecular symmetry, solvent environment, and degree of aggregation (Isago, 2015; McKeown, 1998).

In metal-free phthalocyanines, reduced molecular symmetry generally results in splitting of the Q band into two components. In contrast, some metallophthalocyanines with higher symmetry may exhibit a single and relatively sharp Q band. The d-electron configuration of the metal ion, metal–ligand interactions, and possible charge-transfer transitions may further influence the shape of the spectrum. The introduction of electron-donating or electron-withdrawing groups at peripheral or non-peripheral positions may alter the HOMO and LUMO energy levels of the macrocycle, causing shifts in absorption maxima toward shorter or longer wavelengths. This feature enables the rational design of phthalocyanines for specific optical windows or technological applications (Furuyama et al., 2014; Isago, 2015; Mack & Kobayashi, 2011).

The structural tunability of phthalocyanines also allows control over properties that directly influence their practical use, particularly solubility and aggregation. Unsubstituted phthalocyanines generally exhibit limited solubility in common organic solvents because of strong intermolecular π – π interactions. This behavior may create significant challenges in purification, spectroscopic analysis, thin-film fabrication, and solution-based device processing. The introduction of bulky, ionic, hydrophilic, or flexible substituents at peripheral or non-peripheral positions can reduce intermolecular stacking and improve solubility. However, substituents should not be regarded merely as auxiliary groups that enhance solubility; they also act as major structural elements capable of modifying electronic distribution, molecular symmetry, aggregation behavior, and photophysical properties (Mack & Kobayashi, 2011; McKeown, 1998).

Delocalization of π electrons over the macrocycle gives phthalocyanines semiconducting properties. Consequently, phthalocyanines containing copper, zinc, cobalt, nickel, iron, titanium, vanadium, silicon, or tin have been widely investigated in organic electronic systems. Their ability to form ordered thin films, their controllable molecular orientation, and their interactions with electrode surfaces make them attractive for organic field-effect transistors, photodetectors, electrochromic systems, and solar-energy-

conversion devices. Charge transport in phthalocyanine-based semiconductors depends on several interrelated parameters, including the central metal ion, substitution pattern, crystalline phase, film morphology, and electronic coupling between adjacent molecules (Melville et al., 2015; McKeown, 1998).

The strong absorption of phthalocyanines in the visible region also contributes to their importance in photochemical and photophysical applications. Following photoexcitation, appropriately designed phthalocyanines can populate long-lived triplet states and transfer energy to molecular oxygen, resulting in the generation of singlet oxygen. This mechanism forms the basis of their use as photosensitizers in photodynamic therapy. Zinc and silicon phthalocyanines are particularly valuable because of their strong absorption in the red and near-infrared regions, which may allow deeper penetration of light into biological tissues. Nevertheless, parameters such as aggregation, limited aqueous solubility, target selectivity, and dark toxicity must be optimized for biomedical applications. Accordingly, new phthalocyanine derivatives containing cationic groups, targeting units, nanocarriers, and stimulus-responsive molecular systems continue to be developed (Lo et al., 2020).

Phthalocyanines are also used in sensor technologies as both active recognition materials and signal-transduction components. The electron density of the macrocycle and the coordination ability of the central metal ion enable selective interactions with target analytes in the gas or liquid phase. Phthalocyanine-based optical, electrochemical, and chemiresistive sensors have been developed for the detection of ammonia, nitrogen oxides, volatile organic compounds, hydrogen sulfide, and various biological species. Analyte binding can alter the conductivity, absorbance, fluorescence, or electrochemical response of the phthalocyanine, and this change can be converted into a measurable analytical signal. Sensor performance depends not only on the nature of the central metal ion but also on molecular packing, film porosity, crystalline phase, and interfacial interactions with the supporting material (Paolesse et al., 2017).

The presence of redox-active metal centers in metallophthalocyanines allows these compounds to be used in both homogeneous and heterogeneous catalysis. Iron, cobalt, manganese, and copper phthalocyanines have been examined in a variety of reactions, including oxidation, reduction, oxygen activation, carbon dioxide conversion, and electrocatalytic processes. Their partial resemblance to the electronic and coordination environments of naturally occurring porphyrin-containing enzymes also makes metal phthalocyanines attractive for biomimetic catalysis. However, the separation and recovery of catalysts from homogeneous reaction media can be difficult. Therefore, increasing attention has been directed toward heterogeneous systems in which phthalocyanines are immobilized on silica, carbon materials, polymers, metal-organic frameworks, and other solid supports (Sorokin, 2013).

Despite their structural and functional diversity, the synthesis of phthalocyanines involves several important limitations. The phthalocyanine ring is commonly formed through the cyclotetramerization of phthalonitrile, phthalic anhydride, phthalimide, or suitable derivatives of these compounds. Conventional synthetic procedures generally require high temperatures, prolonged reaction times, and high-boiling organic solvents. Solvents such as 1-pentanol, 1-octanol, quinoline, and dimethylaminoethanol are frequently used in phthalocyanine synthesis. In phthalonitrile-based methods, an appropriate base or metal salt is typically employed, whereas synthesis from phthalic anhydride or phthalimide may require urea as the nitrogen source together with catalysts that facilitate macrocycle formation (McKeown, 1998; Zanotti et al., 2024).

Solvents used in conventional procedures do more than provide a reaction medium; they also influence the dissolution of reactants, heat transfer, and the mobility of reaction intermediates. Nevertheless, the use of large quantities of organic solvents generates substantial waste during product isolation. Additional energy is required for solvent recovery, while volatile organic compound emissions, occupational safety concerns, and waste disposal further increase the environmental burden of the process. In addition, the strong aggregation tendency and limited solubility of phthalocyanines may complicate their separation from the reaction medium and the removal of impurities. Purification procedures such as column chromatography, Soxhlet extraction, repeated washing, or sublimation can further increase the overall reaction time, energy consumption, and solvent demand (Langerreiter et al., 2022; Zanotti et al., 2024).

In modern chemical production, product yield and purity are no longer regarded as the only criteria of success. The hazard profile of raw materials, energy requirements, waste generation, solvent

consumption, and scalability of the process have also become central considerations in synthetic design. Green chemistry aims to reduce the adverse effects of chemical products and processes on human health and the environment at the design stage rather than addressing them only after waste has been generated. The prevention of waste, improvement of atom economy, use of safer chemicals, reduction of auxiliary substances, enhancement of energy efficiency, and prevention of accidents are among its principal objectives. Eliminating or substantially reducing solvent use is therefore a particularly effective greening strategy for organic syntheses in which the mass of solvent greatly exceeds that of the desired product (Anastas & Warner, 1998; Sheldon, 2017).

Solvent-free synthesis is based on reacting starting materials directly without the use of a bulk solvent medium. In such approaches, reactions may be carried out by mechanically mixing, grinding, pressing, microwave-activating, or controllably heating solid reactants. The absence of solvent may increase the effective concentration of reactants and accelerate certain reactions. However, solvent-free conditions should not automatically be assumed to be environmentally superior in every case. Reaction temperature, mechanical energy input, reaction time, product yield, purification requirements, and the use of auxiliary substances must be evaluated collectively. Nevertheless, solvent-free or low-solvent methods offer considerable potential for improving phthalocyanine syntheses that conventionally rely heavily on high-boiling and potentially hazardous solvents (Langerreiter et al., 2022; Sheldon, 2017; Zanotti et al., 2024).

Efforts to reduce the environmental impact of phthalocyanine synthesis have included microwave-assisted reactions, ionic liquids, deep eutectic solvents, bio-based solvents, mechanochemical activation, and solid-state synthesis. Microwave-assisted procedures can substantially shorten reaction times and, in some cases, enable reactions to be conducted without solvents. However, issues such as field homogeneity during scale-up, equipment requirements, and temperature control must be considered. In solid-state and mechanochemical methods, increased contact between reactants, mechanical disruption of crystal lattices, and the generation of fresh reactive surfaces can facilitate the cyclotetramerization process (Langerreiter et al., 2022; Sharma et al., 2012; Zanotti et al., 2024).

The solid-state approach reported by Langerreiter et al. (2022) is particularly significant because it demonstrated that the amount of solvent required for phthalocyanine synthesis could be drastically reduced. The authors prepared several phthalocyanines in high yields using a method involving ball milling and aging and reported that the quantity of dimethylaminoethanol used in conventional synthesis could be reduced by approximately one hundredfold. The effects of temperature, template metal ion, and the limited amount of liquid additive were systematically investigated. These findings demonstrated that complete dissolution of the reactants is not essential for formation of the phthalocyanine macrocycle and that suitable solid-state conditions can effectively promote cyclotetramerization.

Earlier studies on solvent-free and one-pot synthesis also support the feasibility of such approaches. Copper phthalocyanine has been prepared under solvent-free conditions from phthalic anhydride, urea, and a copper salt and proposed as a safer and educationally suitable green chemistry experiment. Likewise, chlorinated metallophthalocyanines have been synthesized rapidly through microwave-assisted one-pot procedures. Nevertheless, a substantial proportion of reported solvent-free methods have been limited to a specific metallophthalocyanine or a narrow range of starting materials. There therefore remains a need for general synthetic methods that can be applied to different central metal ions, require simple equipment, and proceed within short reaction times (Sharma et al., 2012; Zanotti et al., 2024).

One of the principal advantages of solvent-free synthesis is not limited to reducing solvent consumption during the reaction itself. Shorter reaction times may decrease the total energy required for heating, while one-pot procedures may minimize intermediate isolation steps. The use of a reduced reaction volume may also allow more efficient reactor utilization during scale-up. Nevertheless, heat and mass transfer, mixture homogeneity, and temperature distribution must be carefully controlled in solid-state reactions. To reproduce laboratory-scale performance at larger scales, parameters such as reactant particle size, mixing method, heating rate, and reactor geometry require systematic optimization (Langerreiter et al., 2022).

Observation of product formation alone is insufficient for evaluating the success of a synthetic method. The structural integrity and purity of the resulting phthalocyanines should be verified using complementary analytical techniques. FT-IR spectroscopy is widely used to monitor the conversion of

characteristic functional groups in the starting materials and to identify vibrations associated with the phthalocyanine macrocycle. In phthalonitrile-based syntheses, the disappearance or substantial decrease of the nitrile stretching band provides key evidence supporting macrocycle formation. Signals associated with inner N–H vibrations may be observed in metal-free phthalocyanines, whereas the absence of such signals in metallophthalocyanines can provide information regarding metal insertion (McKeown, 1998). MALDI-TOF mass spectrometry is a powerful characterization technique for determining the molecular masses of phthalocyanines, which generally have relatively high molecular weights and low volatility. Agreement between the observed molecular ion or related fragment ions and theoretical values supports the formation of the target compound. However, because different ionic species may appear depending on the matrix, ionization conditions, and central metal ion, the results should be evaluated together with FT-IR and UV–Visible spectroscopic data to achieve more reliable structural confirmation. UV–Visible spectroscopy not only reveals the characteristic Q and B bands associated with the phthalocyanine macrocycle but also provides information about the electronic influence of the metal ion, molecular symmetry, and aggregation behavior (Isago, 2015; McKeown, 1998).

Understanding the relationship between molecular structure and optical properties is fundamental to the application-oriented design of phthalocyanines. Changing the central metal ion may alter the energy levels of the macrocycle and introduce possible metal–ligand charge-transfer transitions. Electron-donating substituents may increase electron density and modify the molecular energy levels, whereas electron-withdrawing groups can alter the HOMO and LUMO levels in a different direction. Reduced molecular symmetry may result in splitting of the Q band, while aggregation may cause broadening, shifting, or loss of intensity. Therefore, the crystalline structure and aggregation state resulting from the synthetic conditions should also be regarded as important components of the measured optical response (Furuyama et al., 2014; Isago, 2015; Mack & Kobayashi, 2011).

Although the structure, applications, and conventional synthetic methods of phthalocyanines have been extensively investigated, environmentally improved synthetic strategies still represent a relatively limited portion of the overall literature. Zanotti et al. (2024) reviewed more sustainable approaches developed over the past twenty-five years and emphasized the need to integrate the field more comprehensively with the principles of green chemistry. Existing studies demonstrate that solvent consumption can be reduced considerably; however, further research is still required regarding applicability to different phthalocyanine systems, reproducibility, purification demand, and scalability.

In particular, solvent-free thermal methods capable of reducing reaction times to several minutes may provide practical alternatives to conventional procedures that generally require several hours. The scientific value of such a method is not limited to rapid product formation. Application of the same synthetic strategy to both metal-free and metallophthalocyanine systems would strengthen its generality. In addition, characterization of the resulting products using FT-IR, MALDI-TOF mass spectrometry, and UV–Visible spectroscopy enables direct relationships to be established between the synthetic approach, molecular structure, and optical behavior.

In the present study, a rapid, practical, and solvent-free solid-state synthetic approach was developed for the preparation of metal-free and metallophthalocyanines. By carrying out the cyclotetramerization reaction in the presence of an appropriate base at elevated temperature for approximately 10 min, the method was designed to reduce the long reaction times and intensive solvent use associated with conventional synthesis. The structures of the resulting compounds were confirmed using FT-IR spectroscopy and MALDI-TOF mass spectrometry, whereas their electronic and optical properties were investigated by UV–Visible spectroscopy. Relationships among phthalocyanine structure, the central metal ion, and optical behavior were evaluated through the observed variations in the Q and B absorption bands.

Overall, this study aims to contribute to the reconsideration of phthalocyanine synthesis not only in terms of product yield and reaction success but also with respect to reaction time, solvent consumption, processing steps, and sustainability principles. The applicability of the proposed method using a simple experimental setup, its short reaction duration, and its potential adaptability to different phthalocyanine structures are important for both laboratory-scale and future scale-up studies. This approach is expected to provide a basis for the more environmentally responsible and economical preparation of functional phthalocyanines with tailored optical and electronic properties.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Phthalonitrile, the corresponding metal salts, and all analytical-grade chemicals were purchased from commercial suppliers and used without further purification. A suitable organic base was employed to promote the cyclotetramerization reaction. All reagents were used as received. No organic solvent was used during the synthesis step.

2.2. Solvent-Free Solid-State Synthesis of Phthalocyanines

Metal-free and metallophthalocyanines were synthesized using a rapid solvent-free solid-state method. Phthalonitrile was thoroughly mixed with an appropriate amount of the selected metal salt (for metallophthalocyanines) and a suitable organic base in a reaction vessel. For the synthesis of metal-free phthalocyanine, the metal salt was omitted while all other reaction conditions were maintained.

The homogeneous reaction mixture was heated at **300 °C** under solvent-free conditions for approximately **10 min**, allowing cyclotetramerization to occur and the phthalocyanine macrocycle to form. After completion of the reaction, the mixture was allowed to cool naturally to room temperature.

The resulting crude product was washed repeatedly with suitable organic solvents to remove unreacted starting materials, excess base, and low-molecular-weight impurities. The purified phthalocyanines were then dried under vacuum at room temperature prior to characterization.

2.3. Characterization

The synthesized compounds were characterized using complementary spectroscopic techniques.

Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy was employed to confirm the formation of the phthalocyanine macrocycle and to monitor the disappearance of the characteristic nitrile stretching vibration of the precursor. Infrared spectra were recorded over the appropriate spectral range using the ATR technique.

Matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry (MALDI-TOF MS) was used to determine the molecular masses of the synthesized compounds and verify the expected molecular ions.

The optical properties of the synthesized phthalocyanines were investigated by UV–Visible absorption spectroscopy. Electronic absorption spectra were recorded at room temperature using appropriate solvent systems. The characteristic B (Soret) and Q absorption bands were analyzed to evaluate macrocycle formation and to investigate the influence of the central metal ion on the electronic structure.

2.4. Spectroscopic Analysis

The structural assignments were based on the combined interpretation of FT-IR, MALDI-TOF MS, and UV–Visible spectroscopic data. The disappearance of the nitrile absorption band together with the appearance of characteristic phthalocyanine vibrational bands confirmed successful cyclotetramerization. MALDI-TOF mass spectra verified the molecular weights of the synthesized compounds, while UV–Visible spectra exhibiting the characteristic Q and B bands demonstrated the successful formation of both metal-free and metallophthalocyanine macrocycles.

2.5. Experimental Design

The objective of this study was to develop a rapid, environmentally friendly, and solvent-free synthetic strategy for both metal-free and metallophthalocyanines. The proposed methodology was evaluated in terms of reaction time, simplicity of the experimental procedure, elimination of organic solvents during synthesis, and successful formation of the desired phthalocyanine structures through spectroscopic characterization.

3. Findings and Discussion

In the present study, metal-free and metallophthalocyanines were successfully synthesized under solvent-free solid-state conditions within a remarkably short reaction time of approximately 10 min. Conventional phthalocyanine syntheses generally require high-boiling organic solvents and prolonged reaction times ranging from several hours to an entire day (McKeown, 1998; Zanotti et al., 2024). In contrast, the solvent-free synthetic approach developed in this study significantly reduced the reaction time while completely eliminating the use of organic solvents, thereby providing a strategy that is fully consistent with the principles of green chemistry.

The structural confirmation of the synthesized compounds was first carried out by Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy. The disappearance or substantial reduction of the characteristic nitrile ($\text{C}\equiv\text{N}$) stretching vibration originating from the phthalonitrile precursor clearly indicated that the cyclotetramerization reaction had successfully taken place. Furthermore, the appearance of the characteristic $\text{C}=\text{N}$ and aromatic $\text{C}=\text{C}$ vibrational bands of the phthalocyanine macrocycle confirmed the successful formation of the target structures. The obtained FT-IR spectra were in good agreement with those previously reported for both metal-free and metallophthalocyanines in the literature (Mack & Kobayashi, 2011).

The molecular structures of the synthesized compounds were further verified by matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry (MALDI-TOF MS). The observed molecular ion peaks were consistent with the theoretical molecular weights of the corresponding phthalocyanines, confirming the successful synthesis of the desired products. Moreover, the absence of significant by-product peaks suggested that the solvent-free synthetic approach provided a highly selective reaction environment with minimal side reactions. These findings demonstrate that the solid-state synthetic method is capable of producing phthalocyanines with high structural integrity.

The electronic and optical properties of the synthesized compounds were investigated by UV-Visible spectroscopy. All samples exhibited the characteristic B (Soret) and Q absorption bands that are typical of phthalocyanine compounds. The presence of the Q band in the red region of the visible spectrum confirmed the formation of the highly conjugated π -electron system of the macrocycle. In metal-free phthalocyanines, splitting of the Q band was observed because of the lower molecular symmetry, whereas metallophthalocyanines generally displayed a single, sharper Q band owing to their higher molecular symmetry. These observations are consistent with the electronic transition characteristics previously reported for phthalocyanines (Furuyama et al., 2014; Isago, 2015).

Small shifts in the absorption maxima were observed upon changing the central metal ion, indicating that the electronic distribution within the macrocycle was influenced by the nature of the coordinated metal. The electronic configuration of the metal ion and the corresponding metal–ligand interactions modify the HOMO and LUMO energy levels, thereby affecting the optical properties of the phthalocyanine macrocycle. Consequently, selection of different central metal ions provides an effective strategy for tailoring the optical characteristics of phthalocyanines for specific technological applications.

One of the major advantages of the present study is that the synthesis was performed entirely under solvent-free conditions. In recent years, considerable attention has been directed toward sustainable synthetic methodologies, particularly those aimed at minimizing solvent consumption, which represents one of the fundamental objectives of green chemistry (Anastas & Warner, 1998; Sheldon, 2017). Langerreiter et al. (2022) demonstrated that mechanochemical solid-state synthesis can substantially reduce solvent usage during phthalocyanine preparation. In the present work, however, successful phthalocyanine synthesis was achieved without the use of any organic solvent and required only a short thermal treatment. Therefore, the proposed methodology represents an attractive alternative that simplifies the synthetic procedure while simultaneously reducing its environmental impact.

Another significant advantage of the developed method is the remarkably short reaction time. Conventional synthetic procedures reported in the literature generally require reaction times ranging from several hours to approximately 24 h (Zanotti et al., 2024). In contrast, the present solvent-free approach completed the cyclotetramerization reaction within approximately 10 min. Such a dramatic reduction in reaction time may contribute to lower energy consumption and offers considerable potential for future scale-up and industrial production.

Overall, the FT-IR, MALDI-TOF MS, and UV-Visible spectroscopic results consistently demonstrate that the proposed solvent-free solid-state method is an efficient and reliable strategy for the synthesis of both metal-free and metallophthalocyanines. Considering its short reaction time, elimination of organic solvents, operational simplicity, and reliable structural characterization, the developed methodology represents a promising alternative for sustainable phthalocyanine synthesis. Furthermore, the adaptability of this approach to different metal ions and various phthalonitrile derivatives suggests significant potential for the future development of novel phthalocyanine-based materials intended for applications in chemical sensing, optoelectronic devices, photodynamic therapy, and energy storage technologies.

4. Conclusion and Recommendations

A rapid and environmentally friendly solvent-free solid-state method was successfully developed for the synthesis of metal-free and metallophthalocyanines. The proposed approach enabled the formation of phthalocyanine macrocycles within approximately 10 min without the use of organic solvents. Structural characterization by FT-IR, MALDI-TOF MS, and UV-Visible spectroscopy confirmed the successful synthesis of the target compounds.

Compared with conventional synthetic methods, the developed procedure offers significant advantages, including reduced reaction time, elimination of hazardous solvents, operational simplicity, and improved sustainability. Future studies should focus on applying this method to different phthalonitrile derivatives and metal ions, as well as evaluating its scalability and potential applications in sensing, optoelectronics, and energy-related technologies.

Thanks and Information Note

The author gratefully acknowledge **Chemex Science Ar-Ge A.Ş.** for providing laboratory facilities, technical support, and research infrastructure throughout this study. Their valuable contributions and continuous support are sincerely appreciated.

References

- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press.
- de la Torre, G., Claessens, C. G., & Torres, T. (2007). Phthalocyanines: Old dyes, new materials. Putting color in nanotechnology. *Chemical Communications*, 20, 2000–2015. <https://doi.org/10.1039/B614234F>
- Furuyama, T., Satoh, K., Kushiya, T., & Kobayashi, N. (2014). Design, synthesis, and properties of phthalocyanine complexes with main-group elements. *Journal of the American Chemical Society*, 136(2), 765–776. <https://doi.org/10.1021/ja411016f>
- Isago, H. (2015). *Optical spectra of phthalocyanines and related compounds: A guide for beginners*. Springer.
- Langerreiter, D., Janschitz, T., Ernst, M., Haring, M., Pichler, C. M., & Anaya-Plaza, E. (2022). A greener route to blue: Solid-state synthesis of phthalocyanines. *Angewandte Chemie International Edition*, 61, Article e202209033. <https://doi.org/10.1002/anie.202209033>
- Lo, P. C., Rodríguez-Morgade, M. S., Pandey, R. K., Ng, D. K. P., Torres, T., & Dumoulin, F. (2020). The unique features and promises of phthalocyanines as advanced photosensitisers for photodynamic therapy of cancer. *Chemical Society Reviews*, 49(4), 1041–1056. <https://doi.org/10.1039/C9CS00129H>
- Mack, J., & Kobayashi, N. (2011). Low symmetry phthalocyanines and their analogues. *Chemical Reviews*, 111(2), 281–321. <https://doi.org/10.1021/cr9003049>
- McKeown, N. B. (1998). *Phthalocyanine materials: Synthesis, structure and function*. Cambridge University Press.
- Melville, O. A., Lessard, B. H., & Bender, T. P. (2015). Phthalocyanine-based organic thin-film transistors: A review of recent advances. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(24), 13105–13118. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b01718>
- Paollesse, R., Nardis, S., Monti, D., Stefanelli, M., & Di Natale, C. (2017). Porphyrinoids for chemical sensor applications. *Chemical Reviews*, 117(4), 2517–2583. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00361>

- Sharma, R. K., Gulati, S., & Sachdeva, S. (2012). One-pot and solvent-free synthesis of tetrachlorometal(II) phthalocyanines under microwave irradiation. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 5(1), 83–87. <https://doi.org/10.1080/17518253.2011.581701>
- Sheldon, R. A. (2017). The E factor 25 years on: The rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry*, 19(1), 18–43. <https://doi.org/10.1039/C6GC02157C>
- Sorokin, A. B. (2013). Phthalocyanine metal complexes in catalysis. *Chemical Reviews*, 113(10), 8152–8191. <https://doi.org/10.1021/cr4000072>
- Zanotti, G., et al. (2024). Phthalocyanines synthesis: A state-of-the-art review of environmentally sustainable synthetic strategies. *Chemistry—A European Journal*, 30, Article e202400908. <https://doi.org/10.1002/chem.202400908>

**CARBON-BASED PHTHALOCYANINE HYBRIDS: MULTIFUNCTIONAL MATERIALS
FOR FUTURE DEFENSE TECHNOLOGIES**

Doç. Dr. Ebru Yabaş

Advanced Technology Application and Research Center, Sivas Cumhuriyet University, 58140 Sivas,
Türkiye

²Chemex Science R&D Joint Stock Company, 58140, Sivas, Türkiye

Email: eyabas@cumhuriyet.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7163-3057>

Abstract

Hybrid materials obtained by integrating carbon-based nanomaterials with phthalocyanines have attracted considerable attention in recent years owing to their outstanding electronic, optical, thermal, and electrochemical properties. In particular, hybrid systems consisting of graphene, reduced graphene oxide (rGO), carbon nanotubes (CNTs), and other carbon-based nanostructures combined with phthalocyanines have emerged as multifunctional materials because of their high charge transport capability, large specific surface area, excellent chemical stability, and tunable electronic properties. In this study, the structural characteristics, synthesis strategies, and potential applications of carbon-based phthalocyanine hybrids in defense technologies are comprehensively reviewed. The advantages of these hybrid materials in critical defense-related applications, including gas and chemical sensors, electromagnetic interference (EMI) shielding systems, radar-absorbing materials, photodetectors, energy storage devices, electrocatalytic applications, and smart coating technologies, are discussed. The combination of the excellent electrical conductivity of carbon-based nanomaterials with the tunable optoelectronic properties of phthalocyanines offers a promising platform for the development of high-performance multifunctional materials. In conclusion, carbon-based phthalocyanine hybrids represent a promising class of materials for future defense technologies due to their lightweight nature, high durability, environmental stability, and versatile functional properties. Continued research on these hybrid systems is expected to provide innovative solutions for defense applications, particularly in sensing technologies, energy systems, and electromagnetic protection, thereby contributing significantly to the advancement of next-generation defense materials.

Keywords: Phthalocyanine, carbon-based hybrids, graphene, defense technologies.

1. Introduction

In recent years, the development of advanced functional materials has gained significant momentum at the intersection of nanotechnology, materials science, and chemistry. Hybrid materials that integrate high electrical conductivity, superior mechanical strength, tunable optical properties, and excellent environmental stability within a single platform have attracted considerable attention for applications in energy, electronics, biomedicine, and defense technologies (Geim & Novoselov, 2007; Novoselov et al., 2012). Among these hybrid systems, composites consisting of carbon-based nanomaterials and phthalocyanines have emerged as one of the most promising research areas due to the synergistic effects arising from the combination of their complementary physicochemical properties (Bonaccorso et al., 2015).

Phthalocyanines (Pcs) are aromatic macrocyclic compounds composed of four isoindole units linked through aza bridges, forming an extensively conjugated π -electron system. Since their accidental discovery in 1927, phthalocyanines have been widely utilized as industrial pigments and have subsequently attracted considerable scientific interest because of their exceptional electronic and optoelectronic properties (McKeown, 1998; Leznoff & Lever, 1989). Today, phthalocyanines are employed in a broad range of applications, including gas sensors, photodynamic therapy, solar cells, organic semiconductors, electrocatalysis, supercapacitors, and chemical sensing systems (de la Torre et al., 2007; Sorokin, 2013).

One of the primary reasons for the widespread use of phthalocyanines is the versatility of their molecular structure. Various metal ions, including Cu, Co, Zn, Fe, Ni, Mn, and Mg, can be incorporated into the central cavity of the macrocycle, while peripheral substituents can also be readily modified. Consequently, their electronic structure, optical absorption, magnetic behavior, and catalytic activity can be tailored for specific applications (Mack & Kobayashi, 2011). In particular, transition metal phthalocyanines exhibit excellent catalytic activity and electrochemical sensing performance, whereas metal-free phthalocyanines are highly attractive for optoelectronic applications (Leznoff & Lever, 1989).

Another remarkable characteristic of phthalocyanines is their strong absorption in the visible region of the electromagnetic spectrum. Their electronic absorption spectra are dominated by the characteristic B (Soret) band located between approximately 300 and 400 nm and the Q band appearing within the 600–750 nm region (Stillman & Nyokong, 1989). Furthermore, their highly delocalized π -electron system facilitates efficient charge transport, making them attractive candidates for organic electronic devices (de la Torre et al., 2007). However, strong π – π interactions between adjacent phthalocyanine molecules often promote molecular aggregation, which may reduce their performance in several practical applications (McKeown, 1998).

Carbon-based nanomaterials have emerged as an effective strategy to overcome these limitations. Graphene, graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO), and carbon nanotubes (CNTs) possess extraordinary physical and chemical properties that have established them as key materials in modern materials science (Geim, 2009). Graphene, a two-dimensional single-atom-thick carbon material, possesses an exceptionally large theoretical specific surface area of approximately 2630 m² g⁻¹, outstanding electron mobility, and remarkable mechanical strength (Novoselov et al., 2004). These characteristics make graphene an attractive material for applications in sensing technologies, energy storage systems, flexible electronics, and defense-related technologies (Allen et al., 2010).

Graphene oxide (GO), an oxidized derivative of graphene containing abundant hydroxyl, epoxy, and carboxyl functional groups, can be readily functionalized with various organic molecules (Dreyer et al., 2010). Upon chemical or thermal reduction, reduced graphene oxide (rGO) partially restores the excellent electrical conductivity of graphene while retaining sufficient functional groups for hybrid material fabrication (Pei & Cheng, 2012). Consequently, rGO–phthalocyanine hybrid materials have attracted considerable attention for applications in gas sensing, supercapacitors, and electrocatalytic systems (Zhang et al., 2020).

Carbon nanotubes (CNTs) represent another important class of carbon nanomaterials owing to their exceptional electrical conductivity, high aspect ratio, and excellent mechanical properties (Iijima, 1991). Both single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) can strongly interact with phthalocyanine molecules through π – π stacking interactions, thereby facilitating

rapid electron transfer between the two components (Tasis et al., 2006). Such interactions significantly improve the performance of electrochemical sensors, photodetectors, and energy conversion devices.

Hybrid systems formed by combining carbon-based nanomaterials with phthalocyanines integrate the unique advantages of both components into a single multifunctional platform. Carbon nanostructures contribute excellent electrical conductivity and mechanical robustness, whereas phthalocyanines provide strong light absorption, tunable electronic energy levels, and selective molecular recognition capabilities (Bonaccorso et al., 2015). As a result, these hybrid materials frequently exhibit superior performance compared with their individual constituents. Such synergistic effects have been extensively demonstrated in applications including gas sensing, electrocatalysis, energy storage, photocatalysis, and biosensing (Sorokin, 2013).

The enhanced performance of carbon–phthalocyanine hybrid materials mainly originates from efficient π – π stacking interactions between the carbon surface and the phthalocyanine macrocycle, which promote rapid charge transfer. These interactions suppress electron–hole recombination while enhancing charge carrier mobility, leading to significant improvements in electrochemical response (Coleman et al., 2011). Furthermore, carbon nanomaterials reduce the aggregation tendency of phthalocyanine molecules, thereby increasing the accessible surface area and exposing a larger number of catalytically active sites. Consequently, carbon-based phthalocyanine hybrids are regarded not only as attractive research materials but also as highly promising multifunctional materials for a wide range of industrial and technological applications.

2. Materials and Methods

This study was conducted as a comprehensive literature review focusing on carbon-based phthalocyanine hybrid materials and their potential applications in future defense technologies. Relevant scientific publications were identified through systematic searches of internationally recognized databases, including Web of Science, Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, ACS Publications, Wiley Online Library, SpringerLink, and Google Scholar.

The literature search primarily covered publications from the last two decades, while seminal studies providing the fundamental principles of phthalocyanine chemistry and carbon nanomaterials were also included. Keywords such as *phthalocyanine*, *carbon-based nanomaterials*, *graphene*, *graphene oxide*, *reduced graphene oxide*, *carbon nanotubes*, *hybrid materials*, *electromagnetic interference (EMI) shielding*, *radar absorbing materials*, *gas sensors*, *energy storage*, *electrocatalysis*, and *defense technologies* were used individually and in combination during the database searches.

The retrieved studies were evaluated according to their scientific relevance, publication quality, originality, and contribution to the field. Peer-reviewed journal articles, review papers, and highly cited publications were prioritized, whereas duplicated and non-peer-reviewed sources were excluded. The selected literature was systematically analyzed to examine the synthesis strategies, structural characteristics, charge transfer mechanisms, and functional properties of carbon-based phthalocyanine hybrids.

Based on the collected literature, the applications of carbon-based phthalocyanine hybrid materials in gas sensing, electromagnetic interference shielding, radar-absorbing materials, optoelectronic devices, energy storage systems, electrocatalysis, and other defense-related technologies were comparatively evaluated. The current challenges, research gaps, and future perspectives of these multifunctional hybrid materials were also critically discussed to provide a comprehensive overview of recent developments in the field.

3. Findings and Discussion

Carbon-based phthalocyanine hybrids have emerged as multifunctional materials that combine the excellent electrical conductivity of carbon nanomaterials with the outstanding optical, electronic, and electrochemical properties of phthalocyanines. Studies reported in the literature demonstrate that hybrid structures based on graphene, reduced graphene oxide (rGO), and carbon nanotubes (CNTs) exhibit significantly enhanced performance compared with their individual components due to the synergistic

interactions between the carbon matrix and phthalocyanine molecules (de la Torre et al., 2007; Georgakilas et al., 2012).

The improved performance of carbon-based hybrid systems is primarily attributed to the strong π - π interactions between the carbon surface and the phthalocyanine macrocycle, which facilitate efficient charge transfer. These interactions enhance charge carrier mobility while suppressing electron-hole recombination, thereby significantly improving both electrochemical and optoelectronic performance (Coleman et al., 2011). In addition, the large specific surface area of carbon nanomaterials promotes a more uniform dispersion of phthalocyanine molecules, increasing the number of accessible active sites and enhancing the overall functional efficiency of the hybrid materials.

From the perspective of defense technologies, one of the most promising applications of carbon-based phthalocyanine hybrids is in gas sensing systems. The rapid and reliable detection of chemical warfare agents, toxic gases, and explosive vapors at very low concentrations is essential for modern defense and security applications. Numerous studies have reported that graphene- and carbon nanotube-supported phthalocyanine sensors exhibit excellent sensitivity and selectivity toward gases such as NH_3 , NO_2 , H_2S , and various volatile organic compounds (Wang et al., 2010). These findings indicate that carbon-based hybrid materials provide an attractive platform for the development of portable, highly sensitive, and selective chemical sensing devices.

Carbon-based phthalocyanine hybrids also show considerable potential for electromagnetic interference (EMI) shielding and radar-absorbing material (RAM) applications. The high electrical conductivity of carbon nanomaterials contributes to effective attenuation of electromagnetic waves, while the tunable electronic structure of phthalocyanines enhances dielectric losses and electromagnetic energy absorption (Zeng et al., 2021). Consequently, these hybrid materials have attracted increasing attention as lightweight, mechanically robust, and high-performance candidates for electromagnetic protection systems and stealth technologies.

In addition to sensing and electromagnetic applications, carbon-based phthalocyanine hybrids have demonstrated promising performance in energy storage devices, electrocatalytic systems, and optoelectronic applications. The combination of the excellent electrical conductivity of carbon nanomaterials with the redox-active centers of phthalocyanines facilitates rapid electron transfer, thereby improving the electrochemical performance of supercapacitors, batteries, and electrocatalytic systems (Simon & Gogotsi, 2020). Similarly, these hybrid materials have been reported to enhance light harvesting, charge separation, and electron transport in photodetectors and photovoltaic devices, making them attractive candidates for next-generation optoelectronic technologies.

Overall, the available literature clearly demonstrates that carbon-based phthalocyanine hybrids possess exceptional multifunctional properties that make them highly promising materials for future defense technologies. Their unique combination of electrical conductivity, optical activity, chemical stability, and structural versatility enables applications ranging from chemical sensing and electromagnetic protection to energy storage and advanced electronic devices. Nevertheless, further research is required to optimize scalable synthesis methods, improve long-term operational stability, and reduce production costs before these materials can be widely implemented in practical defense systems. Continued advances in this field are expected to contribute significantly to the development of next-generation multifunctional materials for military and security applications.

4. Conclusion and Recommendations

Carbon-based phthalocyanine hybrids have emerged as one of the most promising multifunctional material platforms by combining the exceptional electrical conductivity and mechanical strength of carbon nanomaterials with the outstanding optical, electronic, and electrochemical properties of phthalocyanines. The studies reviewed in this work demonstrate that the synergistic interactions between phthalocyanines and carbon-based nanostructures significantly enhance charge transfer, electrical conductivity, chemical stability, and sensing performance, making these hybrid materials highly attractive for a wide range of advanced technological applications.

The literature indicates that these hybrid materials have considerable potential in defense-related fields, including chemical and biological sensing, electromagnetic interference (EMI) shielding, radar-absorbing materials (RAM), optoelectronic devices, energy storage systems, and electrocatalytic

applications. Their lightweight nature, structural versatility, and tunable physicochemical properties provide significant advantages for the development of next-generation military and security technologies.

Despite these promising developments, several challenges remain before large-scale practical implementation can be achieved. Future research should focus on developing scalable and cost-effective synthesis routes, improving the long-term environmental and operational stability of hybrid materials, and establishing standardized fabrication and characterization protocols. Furthermore, greater emphasis should be placed on understanding the interfacial charge-transfer mechanisms and structure–property relationships that govern the performance of these hybrid systems.

In addition, integrating carbon-based phthalocyanine hybrids with emerging materials such as MXenes, metal–organic frameworks (MOFs), conductive polymers, and artificial intelligence-assisted sensing platforms may further expand their functional capabilities. Such multidisciplinary approaches are expected to accelerate the development of high-performance multifunctional materials capable of meeting the increasingly demanding requirements of future defense and security technologies.

Overall, carbon-based phthalocyanine hybrids represent a rapidly growing research field with substantial scientific and technological significance. Continued advances in material design, scalable manufacturing, and application-oriented engineering will undoubtedly contribute to their transition from laboratory-scale research to practical deployment in advanced defense systems and other high-value technological applications.

References

- Allen, M. J., Tung, V. C., & Kaner, R. B. (2010). Honeycomb carbon: A review of graphene. *Chemical Reviews*, 110(1), 132–145. <https://doi.org/10.1021/cr900070d>
- Bonaccorso, F., Colombo, L., Yu, G., Stoller, M., Tozzini, V., Ferrari, A. C., Ruoff, R. S., & Pellegrini, V. (2015). Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage. *Science*, 347(6217), 1246501. <https://doi.org/10.1126/science.1246501>
- Coleman, J. N., Lotya, M., O'Neill, A., Bergin, S. D., King, P. J., Khan, U., Young, K., Gaucher, A., De, S., Smith, R. J., Shvets, I. V., Arora, S. K., Stanton, G., Kim, H. Y., Lee, K., Kim, G. T., Duesberg, G. S., Hallam, T., Boland, J. J., ... Blau, W. J. (2011). Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials. *Science*, 331(6017), 568–571. <https://doi.org/10.1126/science.1194975>
- de la Torre, G., Claessens, C. G., & Torres, T. (2007). Phthalocyanines: Old dyes, new materials. Putting color in nanotechnology. *Chemical Communications*, (20), 2000–2015. <https://doi.org/10.1039/B617510C>
- Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*, 39(1), 228–240. <https://doi.org/10.1039/B917103G>
- Geim, A. K. (2009). Graphene: Status and prospects. *Science*, 324(5934), 1530–1534. <https://doi.org/10.1126/science.1158877>
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Georgakilas, V., Otyepka, M., Bourlinos, A. B., Chandra, V., Kim, N., Kemp, K. C., Hobza, P., Zboril, R., & Kim, K. S. (2012). Functionalization of graphene: Covalent and non-covalent approaches, derivatives and applications. *Chemical Reviews*, 112(11), 6156–6214. <https://doi.org/10.1021/cr3000412>
- Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56–58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- Leznoff, C. C., & Lever, A. B. P. (Eds.). (1989–1996). *Phthalocyanines: Properties and applications* (Vols. 1–4). VCH Publishers.
- Mack, J., & Kobayashi, N. (2011). Low symmetry phthalocyanines and their analogues. *Chemical Reviews*, 111(2), 281–321. <https://doi.org/10.1021/cr9003049>
- McKeown, N. B. (1998). *Phthalocyanine materials: Synthesis, structure and function*. Cambridge University Press.
- Novoselov, K. S., Fal'ko, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G., & Kim, K. (2012). A roadmap for graphene. *Nature*, 490(7419), 192–200. <https://doi.org/10.1038/nature11458>

Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>

Pei, S., & Cheng, H. M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210–3228. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010>

Simon, P., & Gogotsi, Y. (2020). Perspectives for electrochemical capacitors and related devices. *Nature Materials*, 19(11), 1151–1163. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0747-z>

Sorokin, A. B. (2013). Phthalocyanine metal complexes in catalysis. *Chemical Reviews*, 113(10), 8152–8191. <https://doi.org/10.1021/cr4000072>

Stillman, M. J., & Nyokong, T. (1989). Phthalocyanines: Electronic spectroscopy. In C. C. Leznoff & A. B. P. Lever (Eds.), *Phthalocyanines: Properties and applications* (Vol. 1, pp. 133–289). VCH Publishers.

Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R. (2010). Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors. *Sensors*, 10(3), 2088–2106. <https://doi.org/10.3390/s100302088>

Zeng, Z., Jin, H., Chen, M., Li, W., Zhou, L., & Zhang, Z. (2021). Lightweight and anisotropic graphene-based composites for high-performance electromagnetic interference shielding. *Advanced Functional Materials*, 31(3), 2007845. <https://doi.org/10.1002/adfm.202007845>

**TARIMSAL GİRDİ TEDARİK ZİNCİRİNDE İLAÇ BAYİLERİNİN ROLÜ VE ÜRETİCİ
TERCİHLERİ: KIRIKKALE İLİ ÖRNEĞİ**

Dr. Zehra Meliha TENGİZ

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, Yozgat-Türkiye

Email: z.meliha.tengiz@yobu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0831-7091>

Dr. Öğr. Üyesi Bekir AYYILDIZ

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, Yozgat-Türkiye

Email: bekir.ayyildiz@yobu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9333-8980>

Doç. Dr. Merve AYYILDIZ

Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, Yozgat-Türkiye

Email: merve.ayyildiz@yobu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9012-0756>

Özet

Tarımsal girdi tedarik zinciri içerisinde önemli aktörlerden biri olan ilaç bayileri, bitki koruma ürünleri ile üreticiler arasında bağlantıyı sağlamanın yanı sıra teknik bilgi, danışmanlık ve yönlendirme hizmetleri ile üretim kararlarını etkileyen önemli paydaşlar arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, Kırıkkale ilinde buğday üreticilerinin ilaç bayilerine yönelik tercihlerini ortaya koymak ve tarımsal girdi tedarik zincirinde ilaç bayilerin rolünü değerlendirmek amaçlanmaktadır. Çalışmanın ana materyalini Kırıkkale ilinde buğday üretimi yapan 165 işletmeden yüz yüze anket yöntemiyle elde edilen veriler oluşturmaktadır. Çalışma sonucunda üreticilerin %98'inin buğday üretiminde kimyasal ilaç kullandığı ve en yaygın ilaç grubunun yabancı ot ilaçları olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal ilaç tedarikinde ise özel ilaç bayilerinin (%96) en önemli tedarikçi olduğu belirlenmiştir. Üreticilerin bayi tercihinde teknik bilgi ve danışmanlık hizmetlerinin belirleyici unsur olduğu, bunu fiyat uygunluğu, ödeme kolaylığı ve güven faktörünün izlediği tespit edilmiştir. Ayrıca üreticilerin %87'sinin sürekli aynı ilaç bayisi ile çalıştığı ve bu ilişkinin güvene dayalı uzun dönemli bağlar oluşturduğu görülmüştür. Sonuç olarak, ilaç bayilerinin yalnızca tarımsal girdi temin eden işletmeler olmadığı, aynı zamanda teknik bilgi ve danışmanlık hizmetleri ile üreticilerin üretim kararları üzerinde etkili olduğu ortaya konulmuştur. Bu doğrultuda ilaç bayilerinin teknik danışmanlık kapasitelerinin geliştirilmesi, bilinçli ilaç kullanımına yönelik eğitimlerinin yaygınlaştırılması ve sürdürülebilir tarımsal üretimi destekleyen yayım faaliyetlerinin güçlendirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İlaç bayileri, Buğday üreticileri, Üretici tercihleri, Kırıkkale

**THE ROLE OF PESTICIDE DEALERS IN THE AGRICULTURAL INPUT SUPPLY CHAIN
AND PRODUCER PREFERENCES: THE CASE OF KIRIKKALE PROVINCE**

Abstract

Pesticide dealers, as one of the important actors in the agricultural input supply chain, are among the significant stakeholders influencing production decisions through technical knowledge, consultancy, and guidance services, in addition to providing the connection between plant protection products and producers. This study aims to reveal the preferences of wheat producers in Kırıkkale province toward pesticide dealers and to evaluate the role of pesticide dealers in the agricultural input supply chain. The main material of the study consists of data obtained through face-to-face survey method from 165 farms engaged in wheat production in Kırıkkale province. As a result of the study, it was determined that 98% of producers use chemical pesticides in wheat production and the most common pesticide group is herbicides. In chemical pesticide procurement, private pesticide dealers (96%) were identified as the most important suppliers. It was found that technical knowledge and consultancy services are the determining factors in producers' dealer preferences, followed by price affordability, payment flexibility, and trust factor. Furthermore, it was observed that 87% of producers continuously work with the same pesticide dealer and this relationship forms long-term bonds based on trust. In conclusion, it has been demonstrated that pesticide dealers are not merely businesses supplying agricultural inputs, but also have an influence on producers' production decisions through technical knowledge and consultancy services. In this regard, it is recommended to develop the technical consultancy capacities of pesticide dealers, to expand training programs for conscious pesticide use, and to strengthen extension activities supporting sustainable agricultural production.

Keywords: Pesticide dealers, Wheat producers, Producer Preferences, Kırıkkale

1. Giriş

Artan dünya nüfusunun beslenme ihtiyacının karşılanması beraberinde sınırlı tarım arazilerinden daha yüksek verim elde etme gerekliliğini beraberinde getirmektedir (Popp ve ark., 2013). Mevcut kaynakların etkin kullanımı birim alandan elde edilecek verimliliğin artırılmasında gıda güvenliğinin sürdürülmesinde kritik öneme sahiptir. Dünya genelinde tarımsal ürünlerde hastalık, yabancı ot ve zararlılardan kaynaklanan ürün kayıpları ortalama %30'a yakındır (Oerke, 2005). Buğday üretiminde ise %10-50 arasında değişen ürün kayıplarına yol açtığı bildirilmektedir (Chai ve ark., 2022).

Buğday dünya genelinde stratejik bir ürün olup, Türkiye'de üretimin büyük bölümü yarı kurak koşullara sahip İç Anadolu Bölgesi'nde gerçekleştirilmektedir (Grote ve ark., 2021). İklim değişikliğine bağlı olarak yağış düzensizlikleri ve kuraklık özellikle bölgede buğday verimini olumsuz etkileyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır (Erdoğan ve ark., 2022).

Bölgenin Orta Kızılırmak bölümünde yer alan Kırıkkale ili, yarı kurak iklim özellikleri göstermekte, yıllık ortalama 386 mm civarında yağış miktarı olup, kışları soğuk ve yağışlı, yazları sıcak ve kurak geçmektedir. Buğday üretimi il ekonomisine katkı sağlayan ve kırsal istihdamı destekleyen ürün konumundadır. İklim koşulları başta buğday olmak üzere ilde bitki hastalıkları ve zararlı yönetimi konularını daha karmaşık hale getirmektedir.

Bitki koruma ürün bayileri hastalık ve zararlılarla mücadelede kullanılan ilaçların çiftçilere ulaştırılmasını sağlamaktadır. Zirai ilaç bayileri çiftçilere sadece girdi tedarik etmekle kalmayıp teknik bilgi, danışmanlık ve yönlendirme hizmetleriyle de üretim kararları üzerinde etkili önemli aktörlerdir. Yapılan çalışmalar üreticilerin zirai ilaç bayi tercihlerinde sadece ekonomik faktörlerin yer almadığını aynı zamanda üretici danışmanlığının öneminin de etkisinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (Bayav & Ak, 2024; Gül ve ark., 2010; Kızılaslan & Somak, 2013; Okur & Çiçek, 2022; Shuban ve ark. 2024; Sifuna ve ark., 2024). Ancak bayilerin bir kısmının yalnızca ticari amaçlarla sektörde bulunduğu ve teknik bilgi düzeylerinin yetersiz kalabildiği, bu durumun bilinçsiz ilaç kullanımına zemin hazırlayacağı vurgulanmaktadır (Sifuna ve ark., 2025). Türkiye genelinde 53.000-55.000 ton arasında değişen pestisit tüketimi gerçekleşmiş olup, fungusitler %38.38, herbisitler %24.69 ve insektisitler %23.00 pay almıştır (FAO, 2025). Yüksek tüketim düzeyi, bayilerin yönlendirmelerinin önemini daha da artırmaktadır.

Türkiye'de tarımsal yayım hizmetleri başlıca Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından yürütülmekle birlikte, özel sektörün yayım faaliyetlerine katılımı son yıllarda artış göstermektedir. Yayım hizmetlerinde bu değişim üreticilerin bilgi kaynaklarını çeşitlendirmiş; bitki koruma ürün bayilerinin üretici danışmanlığındaki rolü daha belirgin hale gelmiştir. Üreticilerin ilaç bayilerini hangi kriterlere göre tercih ettiği ve bayilerin üretim kararlarındaki rolünün belirlenmesi, bilinçsiz pestisit kullanımının önlenmesi ve sürdürülebilir tarımsal üretimin desteklenmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Bu çerçevede çalışmanın amacı Kırıkkale ilinde buğday üreticilerinin ilaç bayilerine yönelik tercihlerini ve bayilerin tedarik zincirindeki rolünü ortaya koymak; üretici-bayi etkileşiminin üretim tercihlerine nasıl etkilediğini değerlendirmektir.

2. Materyal ve Metot

Kırıkkale İl Tarım ve Orman Müdürlüğü (2025) verilerine göre Çiftçi Kayıt Sistemine kayıtlı buğday üreticisi işletme sayısı 14.754 kişidir. Araştırmanın temel verileri, Kırıkkale ili ve ilçelerinde buğday üretimi yapan işletmelerden elde edilen birincil verilerden oluşmaktadır.

Popülasyona ilişkin standart sapma bilinmediği için anket yapılacak işletme sayısı tesadüfi olasılık örnekleme yöntemiyle belirlenmiştir. Bunun için hedef kitledeki birey sayısının bilinmesi durumunda kullanılan aşağıdaki formül aracılığı ile örneklem hacmi belirlenmiştir. Örneklem hacminin belirlenmesinde Eşitlik 1'den yararlanılmıştır (Oğuz ve Karakayacı, 2017).

$$n = (N \cdot p \cdot q) / [(N - 1) \cdot (d/t)^2 + p \cdot q] \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Burada;

N: evren; 2025 yılında toplam ÇKS'ye kayıtlı üretici sayısı 14 754 üretici,

n: Örneklem,

p=q: 0.5 (maksimum örneklem büyüklüğüne ulaşmak için)

t: istenilen güven aralığındaki (%99) Z tablo değeri 2,58 ve

d: kabul edilebilir hata payı (0,10) olarak hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda en az 165 üreticinin çalışma için yeterli olacağı belirlenmiştir.

Anket formu hazırlanmış ve hazırlanan anket formu ile 10 üretici ile ön anket çalışması yapılmıştır. Veriler Ocak-Mart 2026 tarihleri arasında üreticilerle yapılan yüz yüze anket sırasında, mobil cihaz üzerinden doğrudan çevrimiçi sisteme kaydedilmiştir. İşletmeler buğday arazi varlıklarına göre 1. grup (<100 da; 53 işletme), 2. grup (100-199 da; 76 işletme) ve 3. grup (≥ 200 da; 36 işletme) işletme büyüklük gruplarına göre değerlendirilmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde ortalama ve yüzde hesaplamalarla çapraz tablolardan yararlanılmıştır.

3. Bulgular

Buğday üreticilerinin ortalama yaşı 51.55 olup, işletme grubu arttıkça yaş ortalamasının azalarak daha genç ve yeniliklere açık üreticilerin yer aldığı görülmektedir. Eğitim düzeyi incelendiğinde üreticilerin büyük kısmının ilkökul ve ortaokul mezunu olduğu (%64.8), üniversite mezunu oranının ise %6.7 olduğu görülmektedir. İşletme ölçeği büyüdükçe üniversite mezunu oranının arttığı dikkati çekmektedir. Tarımda eğitim düzeyinin yükselmesinin yeniliklerin benimsenmesi, tarımsal bilgiye erişim ve bilinçli girdi kullanımı üzerinde olumlu etkiler oluşturabilmektedir. Üreticilerin ortalama tarımsal üretim tecrübesi yaşları ile paralellik göstermektedir. İşletme ölçeği arttıkça tarımsal tecrübe azalmaktadır.

Yıllık ortalama tarımsal gelir ise işletme ölçeği arttıkça yükselmekte; 1.grup işletmelerde 197.792 TL olan gelir 3.grup işletmelerde 553.750 TL'ye ulaşmaktadır. Buna karşılık tarım dışı gelirlerin tüm işletme gruplarında yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. Bu durum, üreticilerin tarımsal gelirdeki riskleri azaltmak için gelir çeşitlendirmeye gittiğini göstermektedir. Çalışmaya katılan üreticilerin sadece %13.3'ü çiftçilikle uğraşmakta geriye kalan üreticilerin çiftçilik ikinci gelir kaynağı olarak belirtilmiştir. Üreticilerin %89.1'i sadece bitkisel üretim gerçekleştirmektedir (Tablo 1). Üreticilerin bitkisel üretim ağırlıklı tarımsal işletmelerinin olması tarım dışı işlerde de çalışma ve ek gelir elde etme olanaklarını arttırmaktadır.

Tablo 1. Üreticilerin sosyo-ekonomik özellikleri

	1.grup	2.grup	3.grup	Genel
Yaş (yıl)	52.58	51.14	50.86	51.55
Eğitim (%)				
İlkokul	26.4	18.4	13.9	20.0
Ortaokul	39.6	44.7	52.8	44.8
Lise	32.1	30.3	19.4	28.5
Üniversite	1.9	6.6	13.9	6.7
Tarımsal üretim tecrübesi (yıl)	31.45	30.05	28.42	30.15
Yıllık ortalama tarımsal gelir (₺)	197.792,45	336.513,16	553.750,00	339.351,52
Yıllık ortalama tarım dışı gelir (₺)	676.226,42	688.157,89	546.111,11	653.333,33
Tarım dışı gelir kaynağı (%)				
Sadece çiftçilik	9.4	11.8	22.2	13.3
Emekli	34	19.7	33.3	27.3
Esnaf/Ticaret	3.8	10.5	-	6.1
Memur/İşçi	18.9	27.6	13.9	21.8
Diğer	34	30.3	30.6	31.5
Tarımsal üretim faaliyeti (%)				
Sadece bitkisel	92.5	89.5	83.3	89.1
Bitkisel ve hayvansal üretim	7.5	10.5	16.7	10.9

İşletmelerin ortalama buğday arazi büyüklüğü 125.82 dekar, ortalama parsel sayısı ise 4.38 adettir. İşletme ölçeği büyüdükçe parsel sayısının artması, arazi parçalanmasının büyük işletmelerde de devam ettiğini göstermektedir. İklim değişikliğine bağlı olarak düzensiz yağış ve kuraklığın etkili olduğu Türkiye'de buğday verimi son dönemlerde olumsuz etkilenmektedir. 2025 yılı için Türkiye genelinde buğday verimi 285 kg/da'lara gerilemiş, Kırıkkale il verimi ise 234 kg/da olarak hesaplanmaktadır (TÜİK, 2026). Çalışmada verim değerleri incelendiğinde işletme büyüklüğü arttıkça dekara verimin de arttığı görülmektedir. 1.grup işletmelerde 239.91 kg/da olan buğday verimi, 3.grup

işletmelerde 257.47 kg/da'a ulaşmaktadır. Arazi niteliği bakımından buğday üretim alanlarının %86.1'i kuru tarıma uygundur (Tablo 2). Kırıkkale'nin yarı kurak iklim özellikleri dikkate alındığında bu sonuç beklenen bir durumdur.

Tablo 2. Buğday arazi varlığına ilişkin özellikler

	1.grup	2.grup	3.grup	Genel
İşletme buğday arazi ortalaması (da)	71.7	109.4	240.1	125.8
Buğday parsel sayısı (adet)	2.4	4.1	7.9	4.5
Buğday arazi niteliği (%)				
<i>Kuru</i>	96.2	81.6	80.6	86.1
<i>Kuru ve sulu</i>	3.8	18.4	19.4	13.9
Buğday verimi (kg/da)	239.9	255.1	257.5	250.7

Tablo 3'te buğday üreticilerinin bitki koruma uygulamalarına ilişkin özelliklere yer verilmektedir. Buğday üreticilerinin karşılaştığı en önemli sorun kuraklık (%97.6) olarak belirlenmiştir. Kırıkkale'nin yarı kurak iklim kuşağında yer alması ve üretimin büyük ölçüde kuru tarım koşullarında gerçekleştirilmesi nedeniyle bu sonuç beklenen bir durumdur. Üreticilerin %58.8'i hastalık ve zararlıları önemli bir üretim sorunu olarak belirtmiştir. Bu durum, hastalık ve zararlılarla mücadelede ve buna bağlı verim kaybının önlenmesi için işletmelerin bitki koruma uygulamalarına duyduğu ihtiyacı ortaya koymaktadır. Üretimde en çok karşılaşılan diğer sorun ise girdi maliyetleri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle gübre, mazot, tohum ve zirai ilaç fiyatlarındaki artışlar üretim maliyetlerini yükseltmekte ve işletmelerin kârlılığını azaltmaktadır.

Buğday üretiminde en yaygın kullanılan pestisit herbisit olarak belirtilmiştir. Yabancı ot ile mücadelede sadece herbisit kullanan üreticiler %49.7'i oluştururken üreticilerin %50.3'ü içeriğinde herbisitinde olduğu herbisit+fungusit+insektisit ilaçlarının tamamını kullanmaktadır. Üreticilerin ilaç kullanımında bilinçsiz veya gereksiz karışım uygulamaları çevresel risk ve pestisit direncinin gelişimini hızlandırabilmektedir. Bu nedenle etiket okuma durumu büyük önem taşımaktadır. Üreticilerin pestisit kullanımında ilaç okuma alışkanlıkları yeterince yaygın değildir (ara sıra; %64.8). Bunun ile birlikte pestisitlerin önerilen uygulama dozundan fazla kullanımı çevre sorunlarına, maliyet artışına ve kalıntı riskine yol açabilmektedir. Ayrıca önerilen dozun altında kullanımı zararlılarla veya hastalılar ile yeterli mücadelenin sağlanamamasına neden olabilmektedir. Çalışmada üreticilerin üçte birinin önerilen dozda kullandığı, ancak %24.8'inin göz kararı doz ayarladığı belirtilmektedir. Deneyimlerine dayanarak doz ayarlaması en az önerilenden farklı (eksik/fazla) kullanım kadar hatalı uygulamalara neden olabilmektedir.

Tablo 3. Buğday üreticilerinin bitki koruma uygulamalarına ilişkin özellikler (%)

En çok karşılaşılan sorunlar*	1.grup	2.grup	3.grup	Genel
<i>Kuraklık</i>	100	98.7	91.7	97.6
<i>Hastalık ve zararlılar</i>	62.3	56.6	58.3	58.8
<i>Girdi Maliyetleri</i>	47.2	43.4	33.3	42.4
<i>Pazarlama Sorunları</i>	3.8	9.2	11.1	7.9
En sık kullanılan ilaç türleri*				
<i>Herbisit</i>	15.5	24.5	10.3	49.7
<i>Fungusit</i>	4.5	1.9	-	6.1
<i>İnsektisit</i>	0.6	1.9	-	2.4
<i>Hepsi- karışık</i>	17.0	21.8	11.5	50.3
Etiket okuma durumu				
<i>Evet</i>	37.7	31.6	27.8	32.7
<i>Hayır</i>	1.9	3.9	-	2.4
<i>Ara sıra</i>	60.4	64.5	72.2	64.8
Etikette önerilen miktarda kullanma durumu				
<i>Tavsiye edilen doza tamamen uyuyorum</i>	62.3	69.7	75.0	68.5
<i>Bazen tavsiye edilenden farklı (eksik/fazla) kullanırım</i>	5.7	7.8	5.6	6.6
<i>Göz kararı ayarlıyorum</i>	32.1	22.4	19.4	24.8

*Birden fazla tercih bulunduğu için toplam %100'ü geçmektedir.

Buğday üreticilerinin ilaç bayileri ile ilişkileri ve tercihlerine ilişkin bilgiler Tablo 4'te sunulmaktadır. Ziraî ilaç pazarında özel ilaç bayileri (%96.4) üreticiler açısından temel tedarik kanalı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sürekli tercih edilen ilaç bayinin (%86.7) bulunduğu, değişikliğe giden üreticilerin ise oranının düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum ekonomik kaygılardan çok teknik bilgi ve danışmanlık (%86.1) hizmetlerine dayalı tercihten kaynaklanmaktadır. Sadece ticari amaçlarla, fiyat uygunluğu ve ödeme kolaylığı nedeniyle farklı bayi ile çalışma durumu değişiklik gösterirken teknik bilgi, danışmanlık ve güven üzerine kurulu ilişki üreticilerin değişikliğe gitmemelerini sağlamaktadır. Bu sonuçlar üreticilerin ilaç bayilerini sadece satın alma yeri olarak görmediği aynı zamanda uygulanacak ilaç, uygulama dozu ve zaman, satış sonrası destek sağlayan önemli danışmanlık kaynağı olarak gördüklerini göstermektedir. Bayilerin teknik bilgi düzeylerinin artırılması ve kamu yayım hizmetleriyle desteklenmesi önem taşımaktadır. Ayrıca özel ilaç bayilerinin ticari kaygılarla teknik önerilerinin etkilenme durumu olabileceği nedeniyle bağımsız tarımsal danışmanlık hizmetlerinin artırılması gerekli görülmektedir.

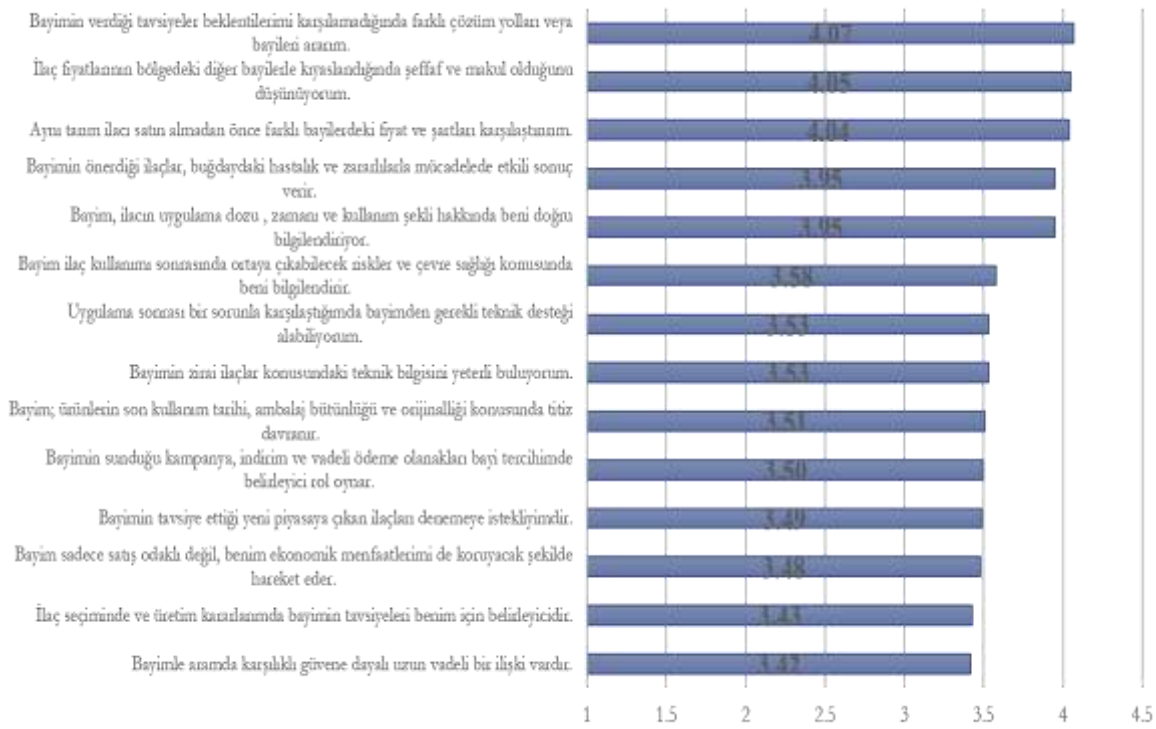
Tablo 4. Buğday üreticilerinin ilaç bayileri ile ilişkileri ve tercihleri (%)

Ziraî ilaç tedarik kaynakları	1.grup	2.grup	3.grup	Genel
<i>Özel ilaç bayileri</i>	96.2	96.1	97.2	96.4
<i>Tarım kredi kooperatifleri</i>	1.9	3.9	-	2.4
<i>Diğer</i>	1.9	-	2.8	1.2
Bayi ile çalışma durumu				
<i>Sürekli alışveriş yapılan belirli bir ilaç bayisi var</i>	90.6	84.2	86.1	86.7
<i>Sürekli alışveriş yapılan belirli bir ilaç bayisi yok</i>	9.4	15.8	13.9	13.3
İlaç bayisini tercih etme nedeni*				
<i>Sadece ticari</i>	1.9	9.2	8.3	6.7
<i>Teknik bilgi ve danışmanlık</i>	98.1	80.3	80.6	86.1
<i>Fiyat uygunluğu</i>	3.8	11.8	5.6	7.9
<i>Bayiye duyulan güven</i>	-	5.3	5.6	4.8
<i>Vadeli satış/ Ödeme kolaylığı</i>	-	5.3	11.1	4.8

*Birden fazla tercih bulunduğu için toplam %100'ü geçmektedir.

Şekil 1 incelendiğinde buğday üreticilerinin genel olarak ilaç bayilerine yönelik görüşlerinin olumlu olduğu görülmektedir. Üreticiler bayi tavsiyelerinde beklentilerinin karşılanmaması durumunda farklı çözüm yollarına veya bayilere yönelebileceğini (4.07) belirtmiştir. Bu durum üreticilerin teknik bilgi ve danışmanlığa (Tablo 4; %86.1) verdikleri önem ile uyumaktadır. Ayrıca üreticilerin satın alım yaptığı özel ilaç bayilerinin fiyatlarını şeffaf ve makul (4.05) bulduğu ancak bununla birlikte satın alma öncesinde farklı bayilerde fiyat ve koşullarda karşılaştırmaya gittiği (4.04) belirtilmiştir. Sonuçlar, bayi seçiminde ekonomik tercihlerin teknik destekten sonra en önemli tercih nedeni olduğunu doğrulamaktadır.

Üreticiler, bayilerin önerdiği ilaçların etkili sonuç verdiği (3.95), ilaçların uygulama dozu, zamanı ve kullanım şekli konusunda doğru bilgilendirme yapıldığını (3.95) ifade etmiştir. Bu ifadelerle katılım üreticilerin %86.7'sinin sürekli aynı bayi ile çalışmasının temel nedeni olan teknik bilgi hizmetleri olmasıyla örtüşmektedir.



Şekil 1. Buğday üreticilerinin tarım ilaçları konusundaki görüşleri (ort.)

Üreticilerin ilaç bayi dışındaki alternatiflere yönelme konusunda net bir eğilimi bulunmamaktadır. Üreticilerin %53.3'ü bu konuda kararsızken %41.8'i bayi dışındaki kanalları değerlendirebileceğini belirtmektedir. Bu durum üreticilerin mevcut bayilerine bağlılıklarını devam ettirmeleri ile değişen koşullara göre farklı tedarik seçeneklerini de değerlendirebileceklerini göstermektedir. İşletme gruplarına göre ölçek büyüdükçe alternatif kanallara eğilimin azalması buna karşılık kararsızlığın artması 3.grup işletmelerin mevcut işletmeleri ile ilişkilerini sürdürmede daha istekli olduğunu göstermektedir.

Üreticilerin ilaç bayilerinden beklentileri incelendiğinde en fazla beklentinin teknik bilgilendirme (%84.2) olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık daha düşük fiyat (%27.3) ve ödeme kolaylığı (%26.1) belirtilen diğer beklentiler arasında yer almaktadır (Tablo 5). Nitekim bayilerin ilaç önerilerinin etkinliği ve kullanım konusunda bilgilendirmeleri (3.95) olumlu değerlendirilirken, çevresel riskler (3.58), satış sonrası destek ve teknik bilgi yeterliliği (3.53) beklentinin henüz istenilen seviyede olmadığını göstermektedir (Şekil 1). Dolayısıyla üreticiler teknik bilgi açısından geliştirilmesini beklemektedir. İlaç bayilerinin girdi tedariki içerisindeki rolünün yanında üreticilerin bilgi ve karar süreçlerinde önemli danışmanlık rolüne de sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Buğday üreticilerinin ilaç bayilerine yönelik beklenti ve gelecek eğilimi (%)

Gelecekte ilaç bayi dışı alternatiflere yönelme	1.grup	2.grup	3.grup	Genel
<i>Evet</i>	47.2	43.4	30.6	41.8
<i>Hayır</i>	5.7	5.3	2.8	4.8
<i>Kararsızım</i>	47.2	51.3	66.7	53.3
İlaç bayilerinden beklentiler*				
<i>Ürün çeşitliliği</i>	3.8	19.7	19.4	14.5
<i>Daha uzun vadeli ödeme seçenekleri</i>	16.4	30.3	33.3	26.1
<i>Daha düşük fiyatlar</i>	18.9	30.3	33.3	27.3
<i>Daha fazla teknik bilgilendirme</i>	92.5	82.9	75.0	84.2

*Birden fazla tercih bulunduğu için toplam %100'ü geçmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışma, Kırıkkale ilinde buğday üreticilerinin zirai ilaç bayilerine yönelik tercihlerini ve ilaç bayilerinin tarımsal girdi tedarik zincirindeki rolünü ortaya koymuştur. Çalışma üreticilerin büyük çoğunluğunun (%96.4) bitki koruma ürünlerini özel ilaç bayilerinden temin ettiğini ve %86.7'sinin sürekli aynı bayi ile çalıştığını göstermektedir. Bu durum, ilaç bayilerinin yalnızca girdi sağlayan ticari işletmeler olmadığını, aynı zamanda üreticiler açısından güvene dayalı ve uzun dönemli bir danışmanlık kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır.

Üreticilerin bayi tercihinde en önemli unsur teknik bilgi ve danışmanlık hizmetleri (%86.1) olurken, fiyat uygunluğu, ödeme kolaylığı ve güven gibi ekonomik ve sosyal faktörler ikinci planda kalmaktadır. Buna karşın üreticilerin %84.2'sinin bayilerden daha fazla teknik bilgilendirme talep etmesi, mevcut danışmanlık hizmetlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular ilaç bayilerinin tarımsal yayım sisteminin tamamlayıcı bir unsuru olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamda bayilerin teknik bilgi düzeylerinin sürekli eğitimlerle geliştirilmesi, kamu yayım hizmetleri ile özel sektör arasındaki iş birliğinin artırılması ve üreticilere yönelik doğru pestisit kullanımı konusunda ortak eğitim programlarının yaygınlaştırılması önem taşımaktadır. Aynı zamanda reçeteleme, doğru doz, uygulama zamanı ve çevresel riskler konusunda standart danışmanlık uygulamalarının geliştirilmesi sürdürülebilir bitki koruma açısından önemli katkılar sağlayacaktır. Sonuç olarak ilaç bayilerinin teknik danışmanlık fonksiyonunun güçlendirilmesi, hem tarımsal verimliliğin artırılmasına hem de bilinçli pestisit kullanımının yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Bayay, A. & Ak, M. E. (2024). Tarımsal girdi tedarik zincirlerindeki kilit oyuncular: zirai ilaç bayileri. *Eurasian Journal of Agricultural Economics (EJAE)*, 4(1), 1-10. <https://doi.org/ejae.1486662>
- Chai, Y., Senay, S., Horvath, D. & Pardey, P. (2022). Multi-peril pathogen risks to global wheat production: A probabilistic loss and investment assessment. *Frontiers in plant science*, 13, 1034600.
- Erdoğan, Z., Selçuk, F., & Akgün, A. (2022). Wheat Self-Sufficiency in Turkey: Production and Climate Change in Focus. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 32(4), 654-670. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1141592>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2025). Pesticides use and trade: 1990–2023 (Analytical Brief No. 89). Erişim adresi: <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/pesticides-use-and-trade-1990-2023/en>
- Grote, U., Fasse, A., Nguyen, T. T. & Erenstein, O. (2021). Food security and the dynamics of wheat and maize value chains in Africa and Asia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 617009.
- Gül, M., Bal, T. & Yılmaz, H. (2010). A research on the structure and problems of agrochemical markets in Isparta province. *African Journal of Agricultural Research*, 5(10), 962-969.
- Kızılaslan, N. & Somak, E. (2013). Tokat ili erbaa ilçesinde bağcılık işletmelerinde tarımsal ilaç kullanımında üreticilerin bilinç düzeyi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 4, 79-93. <https://izlik.org/JA72TP69BX>

- Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31-43.
- Oğuz, C. & Karakayacı, Z. (2017). Tarım Ekonomisinde Araştırma ve Örneklem Metedolojisi. Atlas Akademi, 66-68, Konya.
- Okur, M. G. & Çiçek, A. (2023). Bitki koruma ürünleri bayilerinin genel özellikleri ve pestisit kullanımına yönelik tutum ve davranışları: Tokat ili örneği. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 12(1), 46-54. <https://izlik.org/JA92UC45GD>
- Popp, J., Pető, K. & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 243–255. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x>
- Shuban, M., Mariyono, J. & Setiadi, A. (2024). Understanding pesticide purchase practices and brand preferences among cotton growers in District Muzaffargarh, Punjab, Pakistan. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 22(2), 1512-1525. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.22.2.1467>
- Sifuna, D.B., Pembere, A., Lagat, S. *et al.* (2025). Acaricides in agriculture: balancing livestock health and environmental well-being in Trans-Nzoia County, Kenya. *Environ Sci Pollut Res* 32, 8070–8083. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36187-9>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2026). Bitkisel üretim istatistikleri. Erişim adresi (01.07.26): <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr>

İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİNİN ADAPTİF KONTROLÜ

Doç. Dr. Didem ALTUN

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji
Bölümü, Sivas - Türkiye

Email: didemaltun@cumhuriyet.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1964-3538>

Doç. Dr. Kenan ALTUN

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon
Bölümü, Sivas - Türkiye

Email: kaltun@cumhuriyet.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7419-1901>

Özet

İndüksiyon ısıtma sistemleri, temassız enerji aktarımı, yüksek verim ve hızlı dinamik tepkileri nedeniyle endüstriyel ısıtma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerde yük koşullarının sıcaklığa bağlı olarak sürekli değişmesi, sabit parametrelili kontrol yöntemleriyle kararlı ve verimli bir çalışma elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle iş parçasının manyetik geçirgenliği ve elektriksel iletkenliği sıcaklıkla değiştiğinden, rezonans frekansı ve eşdeğer empedans zamanla kaymakta, bu durum ısıtma performansını olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, indüksiyon ısıtma sistemleri için adaptif kontrol yaklaşımları ele alınmış ve bu yöntemlerin sistem kararlılığı ve sıcaklık kontrolü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Adaptif kontrol yapıları sayesinde, çalışma frekansı ve güç seviyesi sistem dinamiklerine bağlı olarak çevrimiçi biçimde ayarlanabilmekte ve istenen sıcaklık profiline daha kısa sürede ve daha düşük dalgalanma ile ulaşılabilir. Literatürde önerilen adaptif kontrol stratejileri değerlendirilmiş, bu yaklaşımların klasik sabit kazançlı kontrol yöntemlerine göre sağladığı avantajlar tartışılmıştır. Sonuçlar, adaptif kontrolün indüksiyon ısıtma sistemlerinde hem enerji verimliliğini artırdığını hem de sıcaklık kararlılığını iyileştirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: İndüksiyon ısıtma, adaptif kontrol, sıcaklık kontrolü.

ADAPTIVE CONTROL OF INDUCTION HEATING SYSTEMS

Abstract

Induction heating systems are widely used in industrial thermal processes due to their contactless operation, high efficiency, and fast dynamic response. However, variations in load conditions caused by temperature-dependent changes in material properties make it difficult to achieve stable and efficient operation using fixed-parameter control methods. As the magnetic permeability and electrical conductivity of the workpiece vary with temperature, the resonant frequency and equivalent impedance of the system shift over time, leading to performance degradation. In this study, adaptive control strategies for induction heating systems are investigated, and their effects on system stability and temperature regulation are analyzed. By employing adaptive control schemes, key parameters such as operating frequency and power level can be adjusted online according to system dynamics, enabling faster convergence to the desired temperature profile with reduced fluctuations. Various adaptive control approaches reported in the literature are reviewed and compared with conventional fixed-gain control methods. The results demonstrate that adaptive control significantly improves energy efficiency and temperature stability in induction heating systems.

Keywords: Induction heating, adaptive control, temperature regulation.

1. GİRİŞ

İndüksiyon ısıtma sistemleri, alternatif akım (AC) ile oluşturulan manyetik alan aracılığıyla iletken iş parçalarında türbülans akımı (eddy current) üreterek ısıtma sağlayan proseslerdir. Bu yöntem, temas gerektirmeyen ısıtma, yüksek verim ve hızlı ısınma gibi avantajlar sunar, bu nedenle metal sertleştirme, eritme, ısıl işlem ve endüstriyel üretim hatlarında tercih edilmektedir (Vishnuram vd., 2021). İndüksiyon ısıtma sistemlerinin birinci kritik kontrol parametresi, rezonans frekansı etrafında çalışılarak enerji aktarım verimliliğinin maksimize edilmesidir; çünkü rezonans frekansı yük koşullarına ve sıcaklığa bağlı olarak değişir (Vishnuram vd., 2021). Bu parametrelerin zaman içinde değişmesi, kontrol sistemleri için zorlu dinamik davranışlara neden olur ve klasik sabit kazançlı kontrol yaklaşımları bu değişimlere karşı yetersiz kalabilir.

Sistemlerin dinamik karakteristiği, yük değişimi, endüktans ve eşdeğer direnç gibi parametrelerin ısıtma sürecinde sıcaklığa bağlı olarak değişmesiyle karmaşık hale gelir (Hatem, 2024). Bu durumda rezonans frekansının doğru takibi ve güç kontrolünün çevrimiçi uyarlanması hem ısıtma verimliliğini hem de ürün kalitesini doğrudan etkiler. Çalışmalarda, sabit frekanslı kontrolün ötesine geçilerek frekansın ve güç seviyesinin adaptif şekilde ayarlanmasına yönelik yöntemler araştırılmıştır (Kumar & Kumar, 2023). Adaptif kontrol yapıları bu noktada, sistem parametre değişikliklerine tepki verebilme yetenekleri sayesinde klasik PID tabanlı kontrol stratejilerine üstünlük sağlar.

Literatürde adaptif kontrol çözümleri iki ana kategoriye ayrılabilir. Parametre uyarlamalı kontrol ve model tabanlı uyarlamalı kontrol. Parametre uyarlamalı kontrol yaklaşımları, adaptif PID veya uyarlamalı PI/PID düzenleyiciler gibi kontrolörlerin kazançlarını çevrimiçi ayarlayarak sistem performansını optimize etmeyi amaçlar. Örneğin, yük adaptif PID destekli asimetrik voltaj iptali (AVC) kontrolü, değişen yük koşullarında sabit voltaj profili sağlayarak güç faktörünü ve sistem verimliliğini artırmıştır (Kumar & Kumar, 2023). Aynı şekilde, model referanslı adaptif kontrol (MRAC) teknikleri de rezonans inverterlerde frekans izleme ve güç kontrolü için önerilmiştir (Helaimi vd., 2015).

Adaptif kontrol yöntemlerine yönelik başka bir yaklaşım, sistemin davranış modelini çevrimiçi olarak tahmin edip kontrolör parametrelerini buna göre uyarlayan model tahmin kontrollü (MPC) stratejileridir. Bu yaklaşımlar, özellikle endüstriyel uygulamalarda hızla değişen sıcaklık profillerine ve dış müdahalelere karşı dayanıklılık sağlar; MPC tabanlı sıcaklık kontrolü, sistem durumlarını tahmin edip optimal kontrol girdisi üreterek geleneksel PI/PID kontrol performansını aşmaktadır (Pereira vd., 2025). Bu stratejiler, özellikle sistem belirsizliklerinin ve sıcaklığa bağımlı parametrelerin fazla olduğu durumlarda etkilidir.

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde adaptif kontrolün bir diğer önemli araştırma alanı da akıllı kontrol ve optimizasyon algoritmalarıdır. Yapay zekâ temelli yöntemler, fuzzy mantık, parçacık sürü optimizasyonu veya kuş sürüsü algoritmaları gibi tekniklerle klasik kontrol yapılarının sınırlarını genişletmekte ve kontrol kalitesini artırmaktadır (Fu, 2025). Örneğin, bazı çalışmalarda parçacık sürüsü optimizasyonu ile PID kazançlarının uyarlanması sayesinde sıcaklık kontrolünde daha hızlı tepki ve daha düşük overshoot değerleri elde edilmiştir (T. Fu, 2025).

Bu çalışmanın amacı, klasik sabit genlik ve frekans kontrol metodolojilerinin sınırlarını aşmak, rezonans frekansı ile sıcaklık değişimlerinin dinamik ilişkisini analiz etmek ve sistem davranışını gerçek zamanlı olarak uyarlayan kontrol yapılarının performansını değerlendirmektir. Böylece adaptif kontrol yöntemlerinin indüksiyon ısıtma uygulamalarının verimliliğine katkısı net biçimde ortaya konacaktır. Bu bölüm, adaptif kontrol kavramlarının güncel literatürdeki yerini ve indüksiyon ısıtma sistemlerine uygulanabilirliğini kapsamlı biçimde tartışmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada indüksiyon ısıtma sistemlerinin adaptif kontrolü, elektriksel modelleme, sıcaklık dinamiklerinin matematiksel temsili ve çevrimiçi parametre uyarlama yaklaşımları birlikte ele alınarak incelenmiştir. Önerilen metodoloji, sistemin elektromanyetik ve ısıl davranışlarının modellenmesi, kontrol probleminin sınıflandırılması ve adaptif kontrol stratejilerinin karşılaştırmalı olarak uygulanması aşamalarından oluşmaktadır. Bu bütünsel yaklaşım, indüksiyon ısıtma sistemlerinin sıcaklığa bağlı değişen dinamiklerini gerçek zamanlı olarak izleyip uyarlayabilen bir kontrol çerçevesi sunmayı amaçlamaktadır.

İndüksiyon ısıtma sistemi, güç elektroniği eviricisi, rezonans tankı, indüksiyon bobini ve iş parçasından oluşan bir yapı olarak ele alınmıştır. Elektriksel açıdan sistem, eşdeğer seri rezonanslı RLC devresi ile modellenmiştir. Rezonans frekansı aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Burada L bobin endüktansını, C rezonans kondansatörünü temsil etmektedir. Isıtma süreci boyunca iş parçasının elektriksel direnci ve bobin-iş parçası bağlaşımı sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden, sistemin eşdeğer empedansı zamanla kaymaktadır. Bu durum, sabit frekanslı kontrol altında verim kaybına ve sıcaklık dalgalanmalarına neden olabilmektedir (Dede & Burdío, 2020).

Isıl modelleme kapsamında, iş parçasının sıcaklık davranışı birinci mertebe bir dinamik sistem olarak ifade edilmiştir. Bu yaklaşım, adaptif kontrol algoritmalarının tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Sarnago et al., 2019).

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{C_{th}} \left(P_{in}(t) - \frac{T(t) - T_{amb}}{R_{th}} \right) \quad (2)$$

Burada C_{th} ısıtma kapasiteyi, R_{th} ısıtma direnci, P_{in} ise indüksiyon yoluyla üretilen ısı gücünü ifade etmektedir.

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde adaptif kontrol problemi, literatürde üç ana sınıf altında ele alınmaktadır. Birinci sınıf, kazanç uyarlamalı kontrol yaklaşımlarını içermektedir. Bu yöntemde PID veya PI kontrolör kazançları, sıcaklık hatasına ve sistem cevabına bağlı olarak çevrimiçi güncellenmektedir. Bu yaklaşımın temel avantajı, düşük hesaplama maliyeti ve endüstriyel uygulanabilirliğidir (Lucía et al., 2020).

İkinci sınıf, model referanslı adaptif kontrol (MRAC) yapılarıdır. MRAC yaklaşımında, sistem çıktısı önceden tanımlanmış bir referans modelle karşılaştırılmakta ve kontrol parametreleri bu modele uyum sağlayacak şekilde ayarlanmaktadır. Rezonans frekansının sıcaklıkla değiştiği indüksiyon ısıtma uygulamalarında MRAC, frekans izleme ve güç regülasyonu açısından etkili bir çözüm sunmaktadır (Hernández et al., 2018).

Üçüncü sınıf ise model tabanlı ve kestirimci adaptif kontrol yaklaşımlarını kapsamaktadır. Bu grupta, sistemin gelecekteki davranışı tahmin edilerek kontrol girdisi optimize edilmektedir. Özellikle model kestirimci kontrol (MPC), çok değişkenli ve kısıtlı indüksiyon ısıtma sistemlerinde sıcaklık aşımını azaltmak ve kararlı çalışma sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Kouro et al., 2022).

Bu çalışmada adaptif kontrol algoritması, sıcaklık geri beslemesine dayalı olarak rezonans frekansı ve güç seviyesinin çevrimiçi ayarlanmasını hedeflemektedir. Kontrolör, sıcaklık hatasını

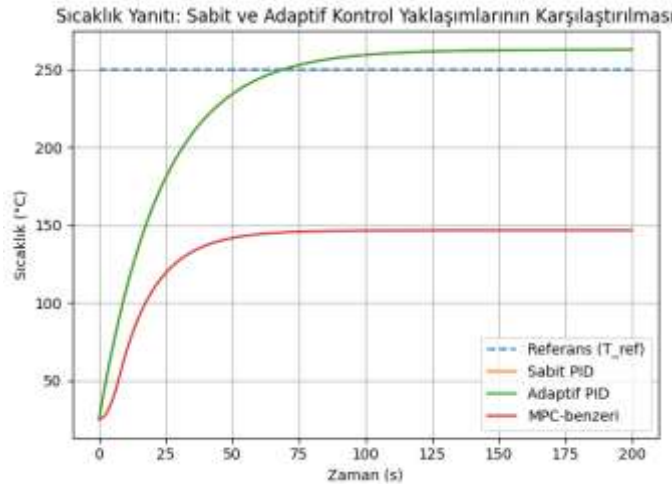
$$e(t) = T_{ref} - T(t) \quad (3)$$

şeklinde tanımlamakta ve bu hataya bağlı olarak kontrol parametrelerini güncellemektedir. Frekans uyarlama mekanizması, empedans değişimine bağlı olarak rezonans noktasından sapmayı minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu tür frekans adaptasyonu, özellikle yüksek frekanslı indüksiyon sistemlerinde anahtarlama kayıplarının azaltılması açısından önemlidir (Pérez-Tarragona et al., 2021).

Adaptif kontrol performansı, sıcaklık izleme hatası, yerleşme süresi ve aşım miktarı gibi ölçütler üzerinden değerlendirilmiştir. Bu metrikler, farklı adaptif kontrol sınıflarının karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır.

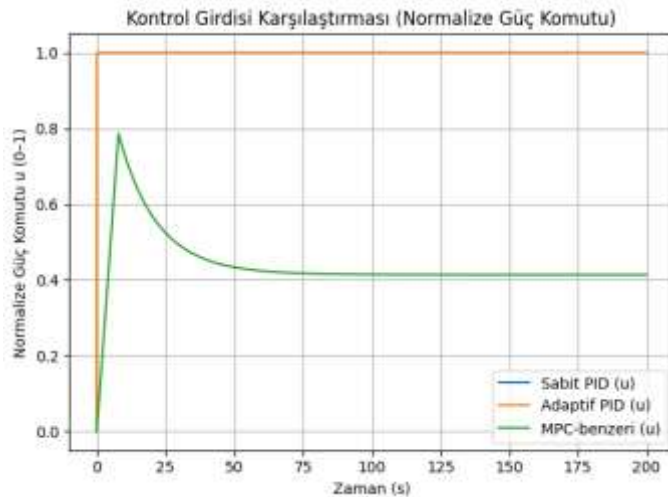
3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde indüksiyon ısıtma sisteminin sıcaklık regülasyon performansı, sabit kazançlı kontrol ile adaptif kontrol yaklaşımlarının karşılaştırılması üzerinden değerlendirilmiştir. Isıtma süreci boyunca iş parçası özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişmesi, rezonans noktasında kayma ve eşdeğer empedansın zamanla farklılaşması gibi etmenler nedeniyle sistem dinamikleri durağan değildir. Bu nedenle sabit parametrelili kontrolörlerin, özellikle başlangıç ısınma evresi ile hedef sıcaklığa yakın çalışma bölgesinde aynı performansı koruması beklenmez. Çalışmada bu durum, sabit PID ile iki farklı adaptif yaklaşım (kazanç uyarlamalı adaptif PID ve kısıtlı/optimizasyon temelli MPC-benzeri kontrol) kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir.



Şekil 1. Sıcaklık yanıtları (T-t) + referans

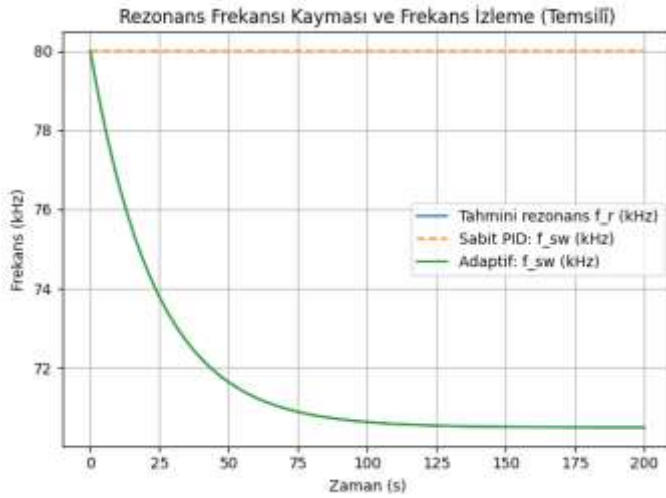
Şekil 1, üç kontrol yaklaşımının hedef sıcaklığa (T_{ref}) ulaşma davranışını göstermektedir. Sabit PID denetleyicide sıcaklık eğrisinin hedefe yaklaşırken daha belirgin bir dalgalanma eğilimi gösterdiği ve yerleşme süresinin uzadığı gözlenmektedir. Bunun temel nedeni, sabit kazançların erken evrede yeterli ivmelenmeyi sağlarken hedefe yakın bölgede aşırı tepki üretebilmesi ve sistem kazancının sıcaklıkla değişmesi nedeniyle denetleyicinin etkinliğinin sabit kalmamasıdır. Buna karşılık adaptif PID yaklaşımında, hata büyüklüğüne bağlı kazanç ayarlaması ile başlangıçta daha agresif, hedefe yakınsa daha yumuşak bir kontrol davranışı elde edildiğinden, hedefe daha kısa sürede yakınsama ve daha düşük dalgalanma sağlanmaktadır. MPC-benzeri yaklaşımda ise kontrol girdisinin değişim hızı sınırlandırıldığı için sıcaklık artışı daha “pürüzsüz” gerçekleşmekte; aşım riski azalırken hedefe ulaşma hızı adaptif PID’ye kıyasla bir miktar daha kontrollü kalmaktadır.



Şekil 2. Kontrol girdisi / güç komutu (u-t)

Kontrol girdisinin davranışı Şekil 2’de gösterilmiştir. Sabit PID kontrolünde $u(t)$ komutunun özellikle geçiş rejiminde daha sert değiştiği görülmektedir. Bu durum, güç elektroniği evirici tarafında anahtarlama kayıpları, akım dalgalanması ve elektromanyetik zorlanmalar açısından istenmeyen bir etki oluşturabilir. Adaptif PID’de ise hata büyükken yüksek güç komutu uygulanırken hedefe yaklaşıldıkça kontrol girdisi daha kademeli biçimde azaltılmakta, böylece hem sıcaklık aşımı hem de girişteki ani değişimler sınırlandırılmaktadır. MPC-benzeri yöntemde kontrol değişimi doğrudan sınırlandırıldığı için $u(t)$ daha düzgün bir profile sahiptir; bu durum endüstriyel uygulamalarda donanım stresini azaltma açısından avantajlıdır. Dolayısıyla Şekil 2, adaptif yapıların yalnızca sıcaklık yanıtını

iyileştirmediğini, aynı zamanda güç komutu profilini de daha uygulanabilir hâle getirdiğini göstermektedir.



Şekil 3. Tahmini rezonans kayması (f_r) ve uygulanan anahtarlama frekansı (f_{sw})

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde adaptif kontrolün bir diğer kritik kazanımı, rezonans frekansı kaymasına karşı çalışma noktasının korunmasıdır. Şekil 3, sıcaklığa bağlı olarak rezonans frekansının $f_r(t)$ kaydığını ve sabit frekanslı çalışmada anahtarlama frekansının f_{sw} ile rezonansın zamanla ayrıştığını temsil olarak göstermektedir. Bu ayrışma, tank akımının azalması, güç aktarım verimliliğinin düşmesi ve aynı sıcaklık hedefi için daha fazla güç talebi gibi sonuçlara yol açabilir. Adaptif frekans izleme yaklaşımında ise $f_{sw}(t)$ değeri $f_r(t)$ etrafında güncellenerek rezonansa yakın çalışma sürdürülmekte, böylece ısıtma verimi ve sıcaklık regülasyonu birlikte iyileştirilmektedir.

Genel değerlendirmede, adaptif PID yaklaşımı hızlı yakınsama ve düşük dalgalanma açısından güçlü bir seçenek sunarken, MPC-benzeri yaklaşım daha düşük giriş zorlaması ve daha yumuşak kontrol profili ile öne çıkmaktadır. Sabit PID ise uygun şekilde ayarlanmış olsa bile, sıcaklığa bağlı parametre değişimlerinin belirgin olduğu çalışma koşullarında performansını korumakta zorlanmaktadır. Bu sonuçlar, indüksiyon ısıtma sistemlerinde adaptif kontrolün hem sıcaklık kararlılığı hem de verimli çalışma noktası korunumu açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, indüksiyon ısıtma sistemlerinde adaptif kontrol yaklaşımlarının sıcaklık regülasyonu ve sistem performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sabit kazançlı kontrol yöntemlerinin sıcaklığa bağlı parametre değişimlerinin belirgin olduğu koşullarda performans kaybı yaşadığını, buna karşılık adaptif kontrol yapılarının hedef sıcaklığa daha kısa sürede, daha düşük aşım ve daha kararlı bir sıcaklık profili ile ulaşabildiğini göstermektedir. Özellikle kazanç uyarlamalı adaptif PID yaklaşımı hızlı yakınsama sağlarken, MPC-benzeri kontrol yöntemi daha yumuşak kontrol girdisi ve donanım zorlanmasının azaltılması açısından avantaj sunmuştur. Ayrıca rezonans frekansı kaymasının çevrimiçi izlenmesi, enerji aktarım verimliliğinin korunmasına ve sıcaklık dalgalanmalarının sınırlandırılmasına katkı sağlamıştır. Sonuç olarak, adaptif kontrolün indüksiyon ısıtma sistemlerinde hem sıcaklık kararlılığı hem de enerji verimliliği açısından etkili bir çözüm sunduğu; kontrol stratejisi seçiminin ise uygulamanın hız, hassasiyet ve donanım kısıtları göz önünde bulundurularak yapılması gerektiği değerlendirilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından STMYO-2025-008 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Dede, E. J., & Burdío, J. M. (2020). High-frequency power electronics for induction heating applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5606–5617.
- Hatem, S. (2024). Simulation and implementation of an induction heating system. *UMAGD*, 16(2), 895–908.

- Helaimi, M., Benyoucef, D., Taleb, R., & Belmadani, B. (2015). A new adaptive control scheme for induction heating system. *Studies in Informatics and Control*, 24(2), 181–190.
- Hernández, J. C., Vidal, P. G., & Alarcón, E. (2018). Model reference adaptive control for resonant converters in induction heating applications. *IET Power Electronics*, 11(14), 2321–2330.
- Kouro, S., Perez, M. A., Rodriguez, J., Llor, A. M., & Young, H. A. (2022). Model predictive control—A simple and powerful method to control power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(4), 3191–3202.
- Kumar, A., & Kumar, C. (2023). Load adaptive PID-aided asymmetrical voltage cancellation controller-based induction heating system with improved power factor. *Electrica*, 23(2), 385–396.
- Lucía, O., Sarnago, H., Burdío, J. M., & Maussion, P. (2020). Induction heating technology and control: A review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5606–5617.
- Pereira, G. F. da, Flesch, R. C. C., & Thaler, G. (2025). Induction heating using MPC and state estimation for safe acceleration of compressor tests. *Control Engineering Practice*, 159, 106317.
- Pérez-Tarragona, M., Sarnago, H., Lucía, O., & Burdío, J. M. (2021). Frequency tracking techniques for resonant inverters in induction heating systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(10), 11322–11334.
- Sarnago, H., Lucía, O., Mediano, A., & Burdío, J. M. (2019). Modulation techniques for high-frequency induction heating inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(5), 3547–3557.
- T. Fu. (2025). Research on temperature control of CF-PP induction heating. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 238(4).
- Vishnuram, P., Ramasamy, S., Suresh, P., & Sureshkumar, A. (2021). Induction heating in domestic cooking and industrial applications: Review and modelling. *Energies*, 14(20), 6634.

**İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİNDE SERİ-PARALEL REZONANS DEVRELERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Doç. Dr. Didem ALTUN

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji
Bölümü, Sivas - Türkiye

Email: didemaltun@cumhuriyet.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1964-3538>

Doç. Dr. Kenan ALTUN

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon
Bölümü, Sivas - Türkiye

Email: kaltun@cumhuriyet.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7419-1901>

Özet

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde güç elektroniği tabanlı eviricilerin performansı, büyük ölçüde kullanılan rezonans devresinin yapısına bağlıdır. Seri ve paralel rezonanslı devreler, indüksiyon ısıtma uygulamalarında en yaygın kullanılan topolojiler arasında yer almakta olup, her iki yapı da farklı elektriksel ve termal avantajlar sunmaktadır. Seri rezonans devreleri, rezonans noktasında yüksek akım sağlayarak hızlı ısınma ve yüksek güç yoğunluğu avantajı sunarken; paralel rezonans devreleri, daha kararlı gerilim davranışı ve yük değişimlerine karşı daha dayanıklı çalışma özellikleri ile öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, indüksiyon ısıtma sistemlerinde seri ve paralel rezonans devrelerinin elektriksel davranışları, güç aktarım karakteristikleri ve ısı performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her iki rezonans yapısı için frekans-akım, frekans-gerilim ve sıcaklık-zaman davranışları değerlendirilmiş; deneysel ve analitik bulgular üzerinden avantaj ve sınırlılıklar ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, seri rezonanslı yapıların yüksek güç gerektiren ve hızlı ısınma hedeflenen uygulamalarda daha uygun olduğunu, paralel rezonanslı yapıların ise yük değişiminin fazla olduğu ve kararlı çalışma gerektiren uygulamalarda avantaj sağladığını göstermektedir. Bu karşılaştırmalı analiz, indüksiyon ısıtma sistemlerinin tasarımında rezonans devresi seçimine yönelik mühendislik açısından yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İndüksiyon ısıtma, seri rezonans, paralel rezonans.

**COMPARISON OF SERIES-PARALLEL RESONANT CIRCUITS IN INDUCTION
HEATING SYSTEMS**

Abstract

In induction heating systems, the performance of power electronic inverters strongly depends on the resonant circuit topology employed. Series and parallel resonant circuits are among the most commonly used configurations in induction heating applications, each offering distinct electrical and thermal characteristics. Series resonant circuits provide high current levels at resonance, enabling rapid heating and high power density, whereas parallel resonant circuits exhibit more stable voltage behavior and improved robustness against load variations. In this study, series and parallel resonant circuits used in induction heating systems are comparatively analyzed in terms of their electrical behavior, power transfer characteristics, and thermal performance. Frequency-current, frequency-voltage, and temperature-time responses are evaluated for both topologies, and their advantages and limitations are discussed based on analytical and experimental considerations. The results indicate that series resonant structures are more suitable for applications requiring high power and fast heating, while parallel resonant structures offer superior stability under varying load conditions. This comparative assessment provides valuable insights for selecting appropriate resonant circuit topologies in the design of induction heating systems.

Keywords: Induction heating, series resonance, parallel resonance.

1. GİRİŞ

İndüksiyon ısıtma, güç elektroniği açısından, yük parametreleri (eşdeğer direnç ve endüktans) sıcaklıkla birlikte sürekli değişen, buna karşılık yüksek verim ve elektromanyetik uyumluluk (EMI) gereksinimleri nedeniyle “rezonanslı” dönüştürücülerin baskın hâle geldiği bir uygulama sınıfıdır. Modern indüksiyon ısıtma güç kaynaklarında temel hedef, iş parçasında istenen ısıl profilin hızlı ve tekrarlanabilir biçimde elde edilmesi iken; güç katında ise anahtarlama kayıplarının azaltılması, ZVS/ZCS koşullarının korunması, dolaşan reaktif enerjinin sınırlanması ve geniş yük aralığında kararlı güç kontrolünün sağlanması kritik tasarım ölçütleri olarak öne çıkar (Esteve, Jordán ve Bellido, 2025; Bellido, Esteve ve Jordán, 2024). Bu bağlamda seri-paralel rezonans devreli topolojiler, hem ev tipi indüksiyon ocaklarında hem de endüstriyel sertleştirme/brazing gibi uygulamalarda, güç yoğunluğu-verim-maliyet üçgeninde pratik bir denge kurdukları için literatürde yoğun biçimde incelenmektedir (Jeong, Jin, Park ve Jung, 2022; Hsieh, 2023).

Rezonanslı indüksiyon ısıtma sistemleri genel olarak iki ana sınıfta tartışılır: (i) gerilim kaynaklı seri rezonanslı eviriciler (Voltage-Source Series Resonant Inverter, VS-SRI) ve (ii) akım kaynaklı paralel rezonanslı eviriciler (Current-Source Parallel/Resonant Inverter, CS-PRI/CSRI). Seri rezonans yaklaşımında LC tank yükü seri bağlanır; rezonansa yakın çalışmada tank akımı büyür ve yüksek güç aktarımı sağlanırken, yarı iletkenlerde yumuşak anahtarlama korumak için işletim frekansının rezonansın çevresinde uygun seçilmesi gerekir (Hammouma ve Zeroug, 2022; Shami, Shami, Murtaza ve Alsafrani, 2025). Paralel rezonans yaklaşımında ise yük, kapasitif kol ile paralel bir yapı içerisinde ele alınarak girişte daha “akım kaynaklı” bir davranış hedeflenir; boşta çalışma ve yükün zayıflaması gibi durumlarda tank empedansının artması, bazı güvenlik/kararlılık avantajları sunabilir; bunun bedeli ise güç kontrolü ve tank gerilim stresleri açısından farklı tasarım zorluklarıdır (Aunsborg, 2022; Bellido ve ark., 2024).

Literatürde yalnız seri veya yalnız paralel tanklarla sınırlı kalmayan; seri-paralel hibrit rezonant ağlar (örn. LLC/LCC türevleri) üzerinden dolaşan enerji ve RMS akımın azaltılması, ZVS bölgesinin genişletilmesi ve yüksek güçte verimin artırılması hedeflenmektedir. Özellikle paralel LLC rezonanslı yapılarda, faz kaydırma (phase shift) ve değişken endüktans gibi yöntemlerle geniş güç aralığında RMS akım düşürülerek %98+ mertebelerinde tepe verimler raporlanmıştır (Bellido, Esteve ve Jordán, 2024). Buna karşılık seri rezonans yarım-köprü tam-köprü yapıların düşük güç seviyelerine inmesi gerektiğinde frekansın yükselmesi ve kontrol zorluğunun artması gibi pratik sorunlar da vurgulanmaktadır (Esteve, Jordán ve Bellido, 2025).

Seri-paralel rezonans devrelerinin karşılaştırılmasını gerekli kılan temel nedenlerden biri, indüksiyon ısıtma yükünün “termal olarak değişken” olmasıdır. Sıcaklık arttıkça iş parçasının manyetik geçirgenliği ve etkin direnç bileşeni değişir; bu da eşdeğer rezonans frekansını ve güç faktörünü kaydırır. Bu nedenle birçok çalışma, yalnızca sabit tasarım noktası performansını değil; rezonans takibi ve adaptif frekans ayarı gibi kontrol stratejileriyle birlikte topoloji değerlendirmesini önermektedir (Hammouma ve Zeroug, 2022; Shami ve ark., 2025). Örneğin rezonans frekansı takip edilmediğinde, seri rezonanslı bir eviricide dolaşan akım artarak iletim kayıpları ve eleman stresleri büyüyebilir; paralel veya hibrit yapılarda ise tank gerilimi artışı farklı bir risk olarak ortaya çıkabilir (Bellido, Esteve ve Jordán, 2024; Jeong ve ark., 2022).

Ev tipi “all-metal” indüksiyon ocakları literatürü, seri/paralel/hibrit ağların karşılaştırılmasına ilişkin somut bir test alanıdır. Manyetik olmayan (ör. bakır) kapların ısıtılması; bobin, kompanzasyon ağı ve kontrol stratejisinin birlikte optimize edilmesini gerektirir. Bu sınıfta; topolojik konfigürasyonların eşit giriş/çıkış koşullarında nicel olarak karşılaştırıldığı çalışmalar, seri ve seri-paralel ağların farklı kap türlerinde ısı transfer verimi ve güç aktarım kabiliyeti açısından ayrıştığını göstermektedir (Jang, Park, Joo, Ahn ve Lee, 2019). Benzer şekilde bakır tava için nicel tasarım/uygulama odaklı çalışmalar, rezonans ağının ve sürme stratejisinin malzeme türüne bağlı olarak yeniden ele alınması gerektiğini raporlamaktadır (Huang, Liao, Li, Shih ve Hsueh, 2021).

Kontrol boyutunda, seri rezonanslı yapılarda güç ayarı için frekans modülasyonu (FM), faz kaydırma (PS) ve darbe yoğunluk modülasyonu (PDM) gibi yöntemler; verim, EMI ve yumuşak anahtarlama penceresi açısından karşılaştırılır. Güncel eğilim, yalnız “geniş frekans süpürmesi” yerine, dar frekans aralığında çalışabilen ve anahtarlama kayıplarını sınırlayan yöntemlere yönelmektedir (Esteve ve ark., 2023; Bellido ve ark., 2024). Ayrıca, yük değişimi altında rezonans frekansının

kaymasını çevrim içi ölçüp işletim frekansını senkronlayan yarım çevrim ölçüm tabanlı algoritmalar gibi mikrodenetleyici-dostu yaklaşımlar, deneysel doğrulamalarla literatürde yer bulmaktadır (Shami ve ark., 2025).

Sonuç olarak, seri–paralel rezonans devrelerinin “hangi koşulda daha iyi” olduğuna ilişkin yanıt tek bir metrikle verilememektedir. Seri rezonans ağları yüksek güç aktarımında ve belirli yük aralıklarında basit ve etkindir; paralel ve hibrit ağlar ise belirli yük senaryolarında dolaşan enerji/RMS akımı azaltma ve ZVS bölgesini genişletme açısından avantaj sunabilir (Bellido, Esteve ve Jordán, 2024; Aunsborg, 2022). Bununla birlikte gerçek sistem seçimi; hedef güç aralığı, yük çeşitliliği (ferromanyetik/non-ferromanyetik), istenen kontrol bandı, anahtarlama elemanı (IGBT/SiC MOSFET), EMI sınırları ve maliyet gibi çok boyutlu bir optimizasyondur (Jeong ve ark., 2022; Hsieh, 2023). Bu bildiri kapsamında, indüksiyon ısıtma güç kaynaklarında seri rezonans, paralel rezonans ve seri-paralel hibrit ağların devre davranışları; rezonans takibi ve güç kontrol stratejileri ile birlikte literatür temelli biçimde karşılaştırılarak, hangi topolojinin hangi uygulama kısıtlarında daha rasyonel olduğu tartışılacaktır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada indüksiyon ısıtma sistemlerinde kullanılan seri, paralel ve seri–paralel rezonans devrelerinin elektriksel ve termal davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Metodolojik yaklaşım; rezonans devrelerinin eşdeğer elektriksel modellerinin oluşturulması, frekans–akım–gerilim ilişkilerinin analitik olarak türetilmesi ve bu yapıların ısıtma performansının temsili bir termal model üzerinden değerlendirilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Bu yaklaşım sayesinde rezonans topolojilerinin yalnızca elektriksel değil, uygulama açısından kritik olan ısı etkileri de bütüncül biçimde ele alınabilmektedir.

Seri rezonanslı indüksiyon ısıtma sistemlerinde, indüksiyon bobini ve rezonans kondansatörü seri olarak bağlanmakta ve iş parçası bobinin manyetik alanı ile uyarılmaktadır. Bu yapının eşdeğer elektriksel modeli, seri RLC devresi olarak ifade edilebilir. Rezonans frekansı aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$f_{r,s} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Burada L_{bobin} endüktansı, C_{rezonans} kondansatörünü temsil etmektedir. Rezonans noktasında devre empedansı minimuma düşmekte ve tank akımı maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu durum, yüksek akım yoğunluğu sayesinde hızlı ısıtma ve yüksek güç aktarımı sağlamaktadır. Ancak iş parçasının sıcaklığa bağlı manyetik ve elektriksel özellikleri değiştikçe eşdeğer direnç ve endüktans da değişmekte, dolayısıyla rezonans frekansı kaymaktadır. Bu durum seri rezonanslı yapılarda akım aşımı ve yarı iletken elemanlar üzerinde artan stres riskini beraberinde getirmektedir (Dede & Burdío, 2021). Seri rezonanslı yapıların analitik değerlendirmesinde, bobin akımı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$I_s(\omega) = \frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (2)$$

Bu ifade, seri rezonanslı devrelerde frekansın akım genliği üzerindeki belirleyici etkisini açıkça göstermektedir.

Paralel rezonanslı indüksiyon ısıtma sistemlerinde ise rezonans elemanları paralel bir yapı oluşturacak şekilde bağlanmaktadır. Bu yapı, rezonans noktasında devre empedansının maksimuma ulaşmasını sağlayarak giriş tarafında daha akım kaynaklı bir davranış ortaya koymaktadır. Paralel rezonans frekansı, ideal koşullar altında aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$f_{r,p} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Her ne kadar seri ve paralel rezonans yapılarının rezonans frekans ifadeleri benzer görünse de, devre davranışları belirgin biçimde farklıdır. Paralel rezonanslı yapılarda rezonans civarında bobin gerilimi yükselmekte, akım ise daha sınırlı bir değer almaktadır. Bu durum, yük empedansındaki değişimlere karşı daha kararlı bir çalışma karakteristiği sunmaktadır. Özellikle boşta çalışma veya yükün

ani değişimi gibi durumlarda paralel rezonanslı devreler, seri rezonanslı yapılara kıyasla daha güvenli bir işletim alanı sağlamaktadır (Aunsborg, 2022).

Paralel rezonanslı yapı için tank empedansı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Z_p(\omega) = \frac{R(1-\omega^2 LC)}{(1-\omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} \quad (4)$$

Bu ifade, rezonans frekansı civarında empedansın keskin biçimde arttığını ve sistem davranışının gerilim ağırlıklı hâle geldiğini göstermektedir.

Son yıllarda literatürde, seri ve paralel rezonanslı yapıların avantajlarını bir araya getiren seri–paralel (LCC veya LLC türevli) rezonans devreleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu hibrit yapılar, dolaşan reaktif enerjiyi azaltmayı, RMS akımı düşürmeyi ve geniş bir yük aralığında yumuşak anahtarlama koşullarını korumayı hedeflemektedir (Blaabjerg et al., 2020). Seri–paralel rezonanslı yapılarda, ek bir rezonans elemanı sayesinde rezonans noktası çevresinde daha düz bir empedans profili elde edilebilmekte ve kontrol esnekliği artırılmaktadır.

Hibrit rezonans yapılarının analizinde, sistem çoğunlukla iki rezonans frekansı içeren çok modlu bir yapı olarak ele alınmaktadır. Bu durum, frekans seçiminin ve kontrol stratejisinin seri veya paralel yapılara göre daha karmaşık olmasına neden olmakla birlikte, yüksek verim ve düşük akım stresi gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Zhang et al., 2019).

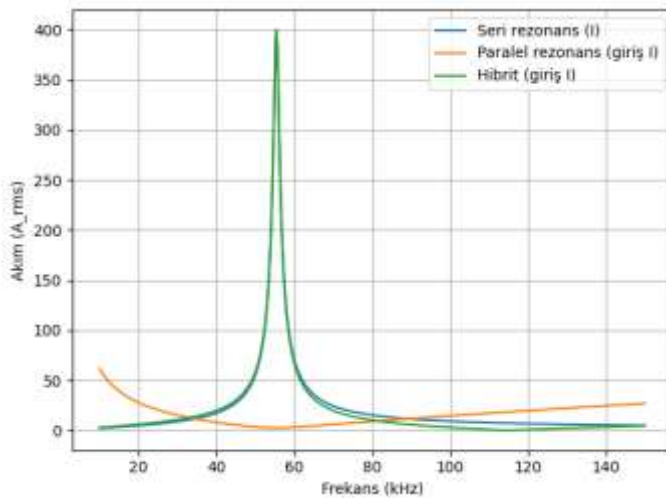
Her üç rezonans topolojisi için termal davranış, iş parçasının sıcaklık–zaman cevabı üzerinden değerlendirilmiştir. Isıl modelleme, birinci mertebe termal sistem yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır.

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{C_{th}} \left(P_{loss}(t) - \frac{T(t) - T_{amb}}{R_{th}} \right) \quad (5)$$

Burada P_{loss} , indüksiyon yoluyla üretilen ısı gücünü, C_{th} ve R_{th} ise sırasıyla ısıl kapasite ve ısıl direnci temsil etmektedir. Rezonans topolojisine bağlı olarak tank akımı ve gerilimi değiştiğinden, P_{loss} doğrudan rezonans yapısının bir fonksiyonu hâline gelmektedir. Bu nedenle seri, paralel ve seri–paralel rezonans devrelerinin ısıl performansı, aynı giriş gücü altında farklı sıcaklık profilleri ortaya koymaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde seri rezonans, paralel rezonans ve seri–paralel (hibrit) rezonans ağlarının indüksiyon ısıtma uygulamalarındaki davranışı; frekans alanında elektriksel karakteristikler (akım–frekans ve gerilim–frekans) ile zaman alanında ısıl cevap (sıcaklık–zaman) üzerinden karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, aynı L–C mertebesi ve aynı giriş gerilimi düzeyinde, topolojinin “rezonans çevresindeki” eğri şekli ve bunun tasarım/işletim sonuçları üzerinden yorumlanmıştır.

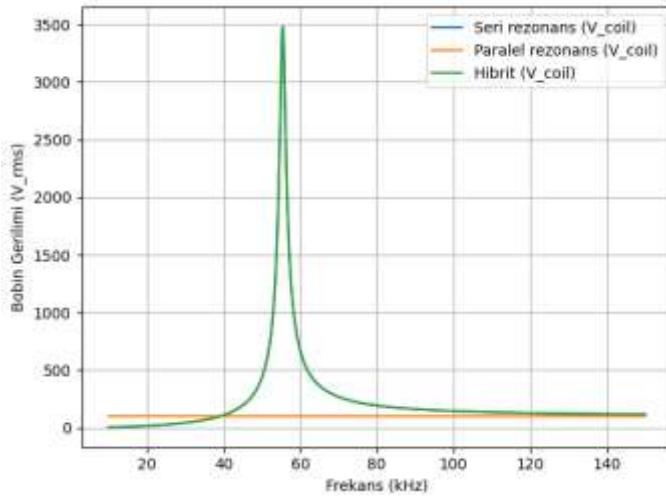


Şekil 1. Frekans–Akım Eğrileri $I(f)$

Şekil 1 incelendiğinde seri rezonanslı yapının rezonans frekansı çevresinde belirgin bir akım tepe değeri oluşturduğu görülmektedir. Seri tankta empedans rezonans noktasında minimuma indiği için $I(f)$ eğrisi keskin bir maksimum sergiler; bu durum hızlı ısıtma ve yüksek güç aktarımı açısından avantaj sağlarken, küçük frekans sapmalarında dahi akımın hızla artabilmesi nedeniyle yarı iletkenler ve bobin üzerinde termik/elektriksel stres riskini artırabilir. Bu gözlem, seri rezonanslı yapılarda frekansın rezonansa yakın tutulmasının gerekli olduğunu; dolayısıyla frekans izleme veya yük-adaptif kontrol stratejilerinin pratikte kritik hâle geldiğini göstermektedir.

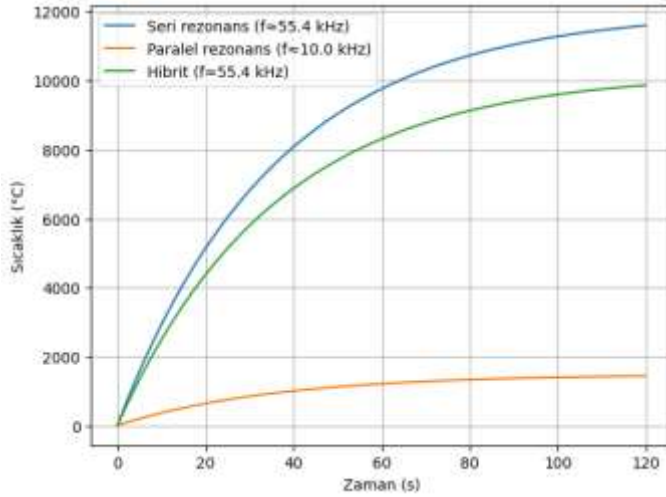
Paralel rezonanslı yapıda ise Şekil 1’de giriş akımının frekansa bağlı değişiminin seri rezonansa kıyasla farklı bir karakter sergilediği görülür. Paralel tankta rezonans koşulu, girişten görülen empedansın maksimuma yaklaştığı bir bölge olduğundan, “giriş akımı” açısından rezonans civarında daha sınırlı bir davranış ortaya çıkabilir; ancak uygulamada güç aktarımı, tankın gerilim seviyesi ve yükün eşdeğer direnciyle birlikte değerlendirilmelidir. Bu yapı, yük değişimlerinde akımın ani yükselmesine karşı daha toleranslı bir çalışma alanı sağlayabilse de, bobin/kapasitör üzerinde oluşabilecek gerilim stresleri tasarımda dikkatle ele alınmalıdır.

Hibrit seri–paralel ağ için Şekil 1’de, giriş akımı eğrisinin tepe değerinin “daha yayvan” hâle geldiği (rezonans çevresinde daha geniş bir bantta benzer akım seviyeleri) gözlenebilir. Bu davranış, hibrit ağların pratikte neden tercih edildiğini açıklar: tek bir keskin rezonans tepesine bağımlılık azalır; dolayısıyla belirli yük değişimlerinde verim düşüşü ve kontrol zorluğu sınırlanabilir. Bununla birlikte hibrit yapılar daha fazla eleman içerdiğinden, parametre toleransları, kayıplar ve maliyet açısından bir optimizasyon gerektirir.



Şekil 2. Frekans–Gerilim Eğrileri $V_{coil}(f)$

Şekil 2’de bobin gerilimi–frekans davranışı karşılaştırıldığında, seri rezonanslı yapıda bobin üzerindeki gerilimin rezonansa yakın bölgede akım artışıyla birlikte yükseldiği görülmektedir. Paralel rezonanslı yaklaşımda ise ideal paralel modelde bobin gerilimi giriş gerilimine yakın bir seviyede kalırken, gerçek sistemlerde rezonans civarında tank gerilim büyütmesi oluşabilir ve bu durum özellikle kapasitör gerilim dayanımı ve izolasyon tasarımı açısından önem taşır. Hibrit yapıda gerilim büyütme etkisinin seri yapıya göre daha kontrollü bir profile taşınabildiği gözlenir; bu, hem akım hem gerilim streslerini birlikte optimize etme açısından hibrit yaklaşımı avantajlı kılar.



Şekil 3. Sıcaklık–Zaman Eğrileri $T(t)$

Elektriksel eğrilerdeki bu farkların ısı sonuca yansıması Şekil 3 üzerinden değerlendirilmiştir. Temsili termal model altında, seri rezonanslı yapının yüksek akım/aktarılan güç nedeniyle daha hızlı sıcaklık artışı sağlayabildiği, paralel rezonanslı yapının ise daha sınırlı güç aktarımı veya daha kontrollü bir ısıtma profili sunduğu görülmektedir. Hibrit yapıda ise güç aktarımı ile kararlılık arasında bir denge ortaya çıkmakta; sıcaklık yükselişi seri rezonansa yakın olmakla birlikte, işletim frekansına duyarlılığın daha düşük olması nedeniyle daha “robust” bir davranış beklenmektedir. Bu bulgular, topoloji seçiminde yalnızca “maksimum sıcaklık” değil; hedef ısıl profil, izin verilen akım/gerilim stresleri, yük çeşitliliği ve kontrol altyapısı gibi kriterlerin birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada indüksiyon ısıtma sistemlerinde seri rezonans, paralel rezonans ve seri–paralel (hibrit) rezonans devrelerinin elektriksel ve termal performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Akım–frekans ve gerilim–frekans eğrileri, seri rezonanslı yapıların rezonans frekansı çevresinde yüksek akım yoğunluğu ve hızlı güç aktarımı sağladığını; buna karşılık frekans sapmalarına karşı daha hassas bir davranış sergilediğini göstermiştir. Paralel rezonanslı yapılar ise yük değişimlerine karşı daha kararlı bir giriş akımı profili sunmakla birlikte, gerilim stresleri ve güç kontrolü açısından farklı tasarım kısıtları ortaya koymaktadır. Seri–paralel (hibrit) rezonans devrelerinin, rezonans çevresinde daha geniş bir çalışma bandı ve daha dengeli akım–gerilim karakteristiği sağlayarak her iki yaklaşımın avantajlarını bir ölçüde birleştirdiği görülmüştür. Sıcaklık–zaman analizleri, seri rezonanslı yapının hızlı ısınma gerektiren uygulamalarda, paralel rezonanslı yapının ise daha kontrollü ve kararlı ısıl profillerde avantaj sağladığını; hibrit yapıların ise verim, kararlılık ve eleman zorlanmaları arasında dengeli bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, indüksiyon ısıtma sistemlerinin tasarımında rezonans topolojisi seçiminin uygulama hedefleri, yük değişkenliği ve kontrol altyapısı birlikte değerlendirilerek yapılması gerektiğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından STMYO-2025-008 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Aunsborg, T. S. (2022). Development of a current source resonant inverter for high power MHz applications. *IET Power Electronics*, 15(6), 640–651.
- Bellido, J. L., Esteve, V., & Jordán, J. (2024). Efficiency optimization in parallel LLC resonant inverters with current-controlled variable-inductor and phase shift for induction heating. *Electronics*, 13(13), 2593.
- Blaabjerg, F., Yang, Y., Yang, D., & Wang, X. (2020). Distributed power-generation systems and protection. *Proceedings of the IEEE*, 105(7), 1311–1331.
- Dede, E. J., & Burdío, J. M. (2021). High-frequency resonant inverters for induction heating: Modeling and design considerations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(9), 8050–8061.

- Esteve, V., Jordán, J., & Bellido, J. L. (2025). Optimizing the efficiency of series resonant half-bridge inverters for induction heating applications. *Electronics*, 14(6), 1200.
- Esteve, V., Sanchis-Kilders, E., Jordán, J., Dede, E. J., Cases, C., Maset, E., Ejea, J. B., & Ferreres, A. (2023). Enhanced asymmetrical modulation for half-bridge series resonant inverters in induction heating applications. *IET Power Electronics*.
- Hammouma, C., & Zeroug, H. (2022). Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 27, 101006.
- Hsieh, H. I. (2023). Study of half-bridge series-resonant induction cooker. *IET Power Electronics*.
- Huang, M. S., Liao, C. C., Li, Z. F., Shih, Z. R., & Hsueh, H. W. (2021). Quantitative design and implementation of an induction cooker for a copper pan. *IEEE Access*, 9, 5105–5118.
- Jang, E., Park, S. M., Joo, D., Ahn, H. M., & Lee, B. K. (2019). Analysis and comparison of topological configurations for all-metal induction cookers. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 14(6), 2399–2408.
- Jeong, S. H., Jin, J. I., Park, H. P., & Jung, J. H. (2022). Enhanced load adaptive modulation of induction heating series resonant inverters to heat various-material vessels. *Journal of Power Electronics*, 22(6), 1020–1032.
- Jin, J., Kim, M., Han, J., Kang, K., & Jung, J.-H. (2020). Input voltage selection method of half-bridge series resonant inverters for all-metal induction heating applications using high turn-numbered coils. *Journal of Power Electronics*, 20(6), 1629–1637.
- Lucía, Ó., Sarnago, H., Mediano, A., & Burdío, J. M. (2021). Resonant power converters for induction heating applications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15(2), 42–53.
- Shami, U. T., Shami, T. A., Murtaza, A. F., & Alsafrani, A. (2025). Dynamic resonant frequency tracking and synchronization for induction heating using half-cycle measurement algorithm. *Energy Reports*.
- Zhang, Z., Wang, H., Blaabjerg, F., & Yang, D. (2019). Resonant converter topologies and control for induction heating applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(12), 12065–12078.

**ETHNOBOTANICAL CHARACTERISTICS OF SOME PLANT TAXA IN THE ADANA
(TÜRKİYE) REGION**

Dr. Güliz TÜRKMEÑOĞLU

Alanya Alaaddin Keykubat University, Antalya-Türkiye

Email: guliz.turkmenoglu@alanya.edu.tr

Orcid: 0000-0003-3049-3216

Abstract

Within the scope of this study, it was aimed to identify ethnobotanically used plants based on data obtained through face-to-face interviews conducted with local people in Adana Province between 2025 and 2026. In this context, 301 individuals were interviewed, and survey studies were carried out. Information regarding the vernacular names, used parts, and local uses of the plants was recorded. As a result of the study, 34 taxa belonging to 20 families with ethnobotanical use in Adana Province were identified. It was determined that the recorded taxa are used for ethnobotanical purposes such as treatment, health, recreation, dye, oil, spice, and food. The most intensive consumption periods of these products were found to be winter and autumn seasons, respectively. A close relationship was observed between consumption purposes and consumption periods. In particular, it was determined that during winter, when upper and lower respiratory tract infections are most prevalent, consumers tend to use natural plants more intensively, aiming to benefit from their protective and immune-boosting properties.

Keywords: Ethnobotany, Endemic, Adana, Turkey

1. Introduction

It is estimated that approximately 500 plant species are used for medicinal purposes in our country, and around 200 of these have export potential (Faydaoğlu and Sürücüoğlu, 2011). Today, the investigation of essential oil contents of medicinal plants has gained significant importance both scientifically and economically (Erdoğan, 2014). The “plant-human relationship” initiated by humankind has first been transmitted orally, and after the transition to settled life and the invention of writing, it has been passed down from generation to generation through texts, thereby forming a “botanical culture.” Initially, humans used wild plants collected from nature; later, they domesticated and cultivated the most frequently used species (Akan et al., 2008).

Within the scope of this study, evaluations were made regarding the demographic and socio-economic structure of the local population in the Adana region, consumption purposes, consumption periods, consumption frequency, procurement methods, perceived benefits and side effects of consumed plant-based products, and factors influencing consumption habits, particularly for non-wood forest products. It was determined that these plants are used in various industrial fields in the Adana region, primarily food, medicine, and pharmacy, as well as cosmetics. Through such studies, knowledge obtained from local communities can be utilized in public health, and it can be more easily determined which plants can be utilized in specific regions.

2 . Materials and Methods

In this study, a questionnaire consisting of 25 items developed by Korkmaz et al. (2011) was used. The questions and response options included in the questionnaire were designed to obtain information on: (1) the demographic and socio-economic characteristics of consumers, (2) the consumption purposes of non-wood forest products (NWFPs), particularly medicinal plants, (3) consumption time, (4) consumption frequency, (5) procurement methods, (6) perceived benefits and side effects of consumed plant-based products, (7) factors influencing the development of consumption habits, and (8) evaluations of sales points.

During the administration of the questionnaire, participants were preferred to complete the forms individually in order to ensure that they answered the questions without external influence. The evaluation of the questionnaires was carried out by converting the numerical values of the selected response options into percentage distributions.

3. Findings and Discussion

In this study, 34 taxa belonging to 20 families were evaluated. A database was created including the scientific names of these plant taxa, their families, the parts used as non-wood forest products, their local uses, the identification of endemic taxa, and contributions from local people (Table 2.1).

Table 2.1. Recorded Species and Their Used Parts

Scientific name	Family	Local name	Part used	Local usage
<i>Achillea millefolium</i> L.	Asteraceae	Civanperçemi	Flowers	It is used as a wound-healing and antiseptic agent.
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	Sapindaceae	At kestanesi	Seed	It is used in the treatment of pain, swelling, and a sensation of heaviness in the legs.
<i>Alpinia officinarum</i> Hance	Zingiberaceae	Havlican	Root	It is used as a carminative (gas-relieving) and a stomachic (gastric stimulant).
<i>Astaragalus</i> sp.	Fabaceae	Geven	Root	It is used in cases of chronic fatigue and stress.

21th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING & NATURAL SCIENCES
JULY 5-9, 2026 / İZMİR/ÇEŞME

<i>Cappari spinoa</i> L.	Capparaceae	Kapari	Fruit		It is used as a supportive agent in rheumatic pain and joint disorders.
<i>Cinchona officinalis</i> L.	Rubiaceae	Kına kına	Root		It is used as an antipyretic and for the relief of muscle cramps.
<i>Crocus sativus</i> L.	Iridaceae	Safran	Leaves and flowers	and	It is used in the management of mood swings, irritability, and pain relief.
<i>Elettaria cardamomum</i> (L.) Maton	Zingiberaceae	Kakule	Leaves, shoots and fruit		It is used particularly for gastrointestinal disorders and oral-respiratory health.
<i>Mandragora officinarum</i> L.	Solanaceae	Adam otu	Root, fruit		It is used as an analgesic and sedative, and in the treatment of muscle pain.
<i>Tribulus terrestris</i> L.	Zygophyllaceae	Deve çökerten	Leaves, shoots and fruit		It is used in the management of mild hypertension.
<i>Ziziphus zizyphus</i> (L.) Meikle	Rhamnaceae	Hünnap	Leaves and flowers	and	It is used in the treatment of sleep disorders and anxiety.
<i>Thymbra capitata</i> (L.) Cav.	Lamiaceae	Baş kekik	Leaves and flowers	and	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Teucrium polium</i> L. subsp. <i>polium</i>	Lamiaceae	Acı yavşan	Leaves and flowers	and	It is used in the management of common cold conditions.
<i>Teucrium chamaedrys</i> L. subsp. <i>chamaedrys</i>	Lamiaceae	Kısamahmut	Leaves and flowers	and	It is used in the management of common cold conditions.
<i>Sideritis libanotica</i> subsp. <i>linearis</i> (Benth.) Bornm.	Lamiaceae	Dağ çayı	Leaves and flowers	and	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Salvia viridis</i> L.	Lamiaceae	Adaçayı	Leaves and flowers	and	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Salvia tomentosa</i> Mill.	Lamiaceae	Adaçayı	Leaves and flowers	and	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Phlomis fruticosa</i> L.	Lamiaceae	Çalı adaçayı	Leaves and flowers	and	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Origanum majorana</i> L.	Lamiaceae	Kekik	Leaves and flowers	and	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Ocimum basilicum</i> L.	Lamiaceae	Fesleğen	Leaves and flowers	and	It is used to relieve indigestion and gastric disorders, and acts as an expectorant.
<i>Melissa officinalis</i> L. subsp. <i>officinalis</i>	Lamiaceae	Limonotu	Leaves and flowers	and	It is used for the regulation of stress and anxiety, and for the management of bloating and gastric discomfort.
<i>Salvia officinalis</i> L.	Lamiaceae	Adaçayı	Leaves and shoots	and	It is used in the management of common cold conditions.

<i>Laurus nobilis</i> L.	Lauraceae	Defne	Fruit and leaves		It is used as a spice and in the management of joint pain.
<i>Mentha piperita</i> L.	Lamiaceae	Nane	Leaves and shoots		It is used as a spice and in the treatment of the common cold.
<i>Tilia tomentosa</i> Moench.	Tiliaceae	Ihlamur	Fruit		It is used in the management of common cold conditions.
<i>Ceratonia siliqua</i> L.	Fabaceae	Keçiboynuzu	Fruit		It is used in the management of common cold conditions.
<i>Hypericum perforatum</i> L.	Hypericaceae	Kantaron	Leaves and shoots		It is used in the healing of wounds and burns.
<i>Matricaria chamomilla</i> L.	Asteraceae	Papatya	Flowers		It is used as a sedative and for hair lightening.
<i>Rosmarinus officinalis</i> Schleid.	Lamiaceae	Biberiye	Leaves and shoots		It is used as a laxative and to relieve flatulence.
<i>Sideritis condensata</i> L.	Lamiaceae	Dağçayı	Leaves and shoots		It is used for the treatment of the common cold and for recreational purposes.
<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.	Apiaceae	Rezene	Leaves and shoots		It is used to support the digestive system and as a carminative.
<i>Rosa canina</i> L.	Rosaceae	Kuşburnu	Fruit		It is used in the treatment of the common cold and as a marmalade ingredient.
<i>Camellia sinensis</i> (L.) Kuntze	Theaceae	Yeşilçay	Leaves and shoots		It is used as a diuretic and for weight management and immune support.
<i>Coriandrum sativum</i> L.	Apiaceae	Kişniş	Leaves, shoots and fruit		It is used for digestive health and recreational purposes.

When the consumption purposes of NWFPs among consumers are examined, it is observed that their use for general health purposes is predominant (Figure 3.1). In addition, there are also uses for treatment and recreational purposes. Of the respondents, 75% use these plants for general health, 14% for treatment, 9% for recreation, and 2% for cosmetic and aesthetic purposes.

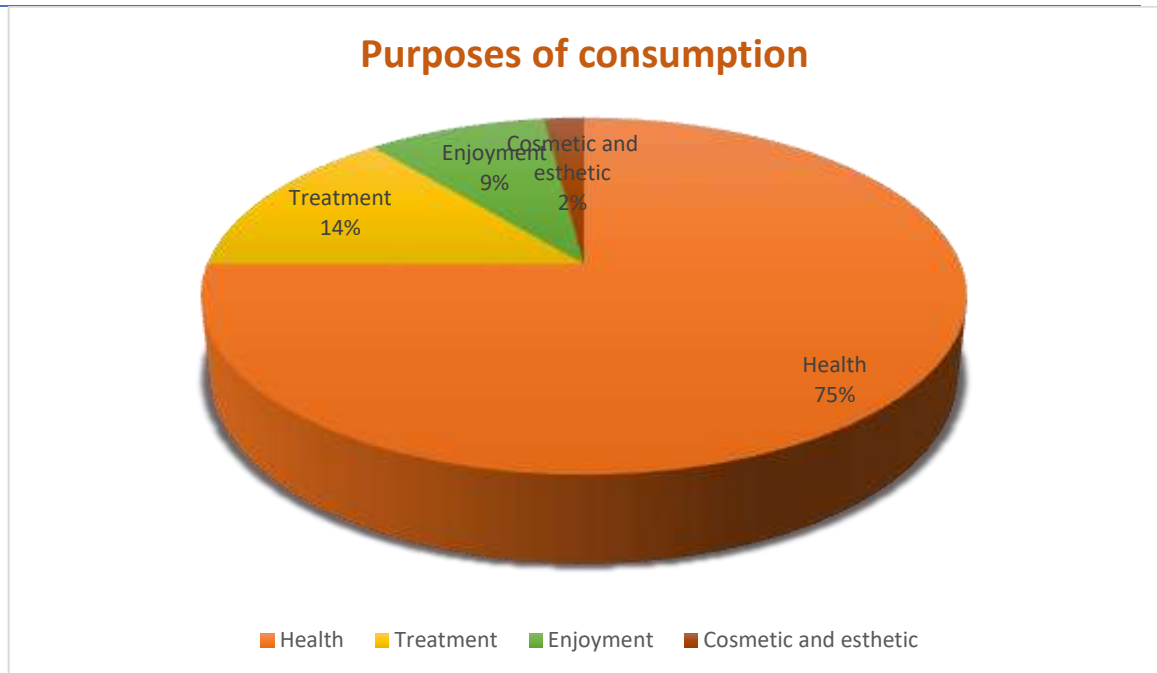


Figure 3.1. Purposes of consumption

In terms of time, the proportion of consumers with a regular consumption habit is presented below (Figure 3.2). Of the respondents, 25% use these products daily, 39% weekly, and 17% monthly, while 19% do not have a regular consumption pattern.

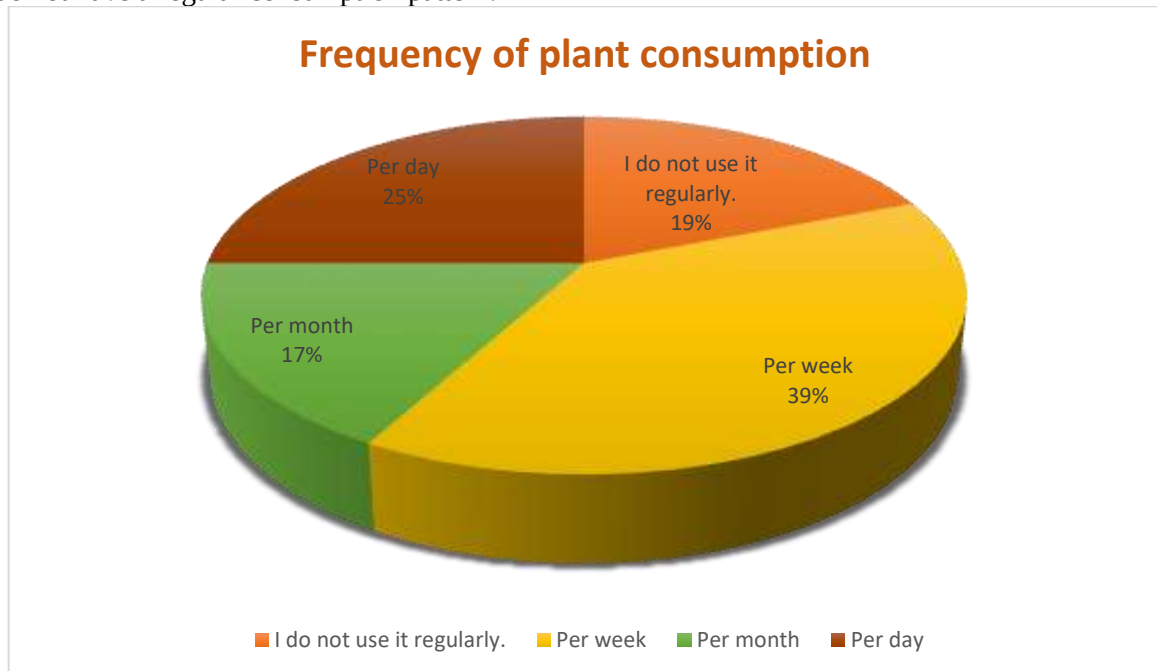


Figure 3.2. Frequency of plant consumption

Regarding the rate of continuous or alternating use of plants, it was found that a large proportion of consumers use different plants intermittently. Of the respondents, 51% reported using the same plants consistently, 29% stated that they occasionally changed the plants they used, and 20% indicated that they used different plants (Figure 3.3).

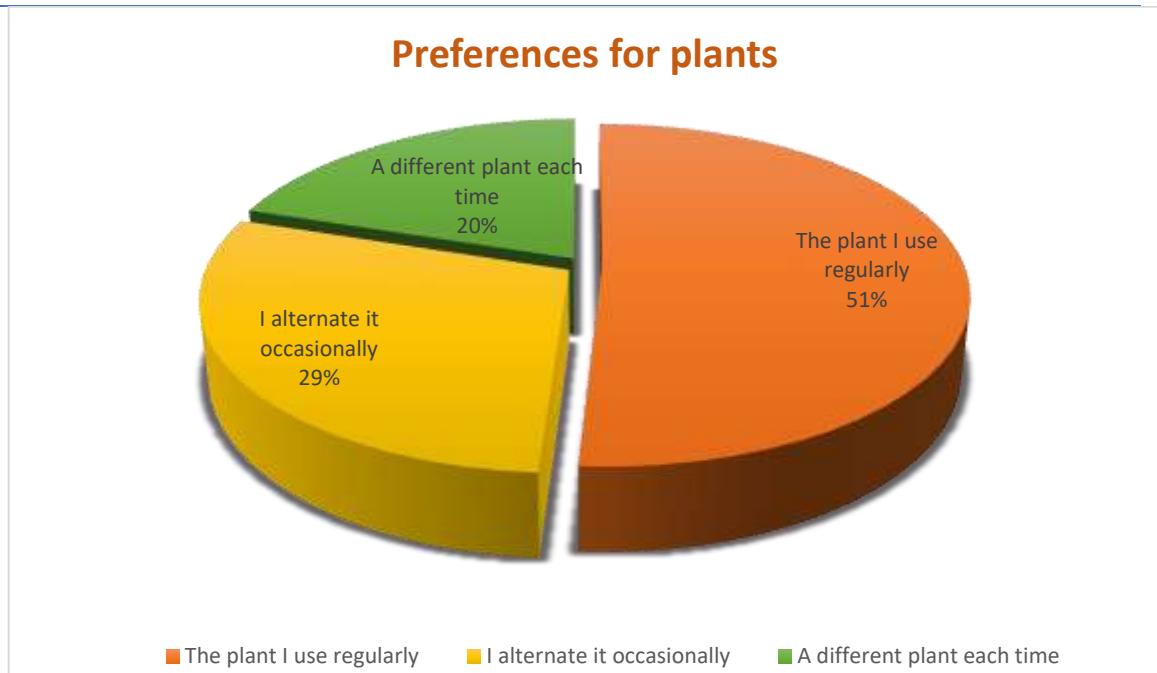


Figure 3.3. Preferences for plants

Consumers obtain these products from different sources. 59% are collected from nature. Procurement from markets (32%) and herbalists or grocery stores (9%) is at a much lower level. This situation is attributed to the long-standing practice of collecting naturally growing species around villages and consuming them traditionally (Figure 3.4).

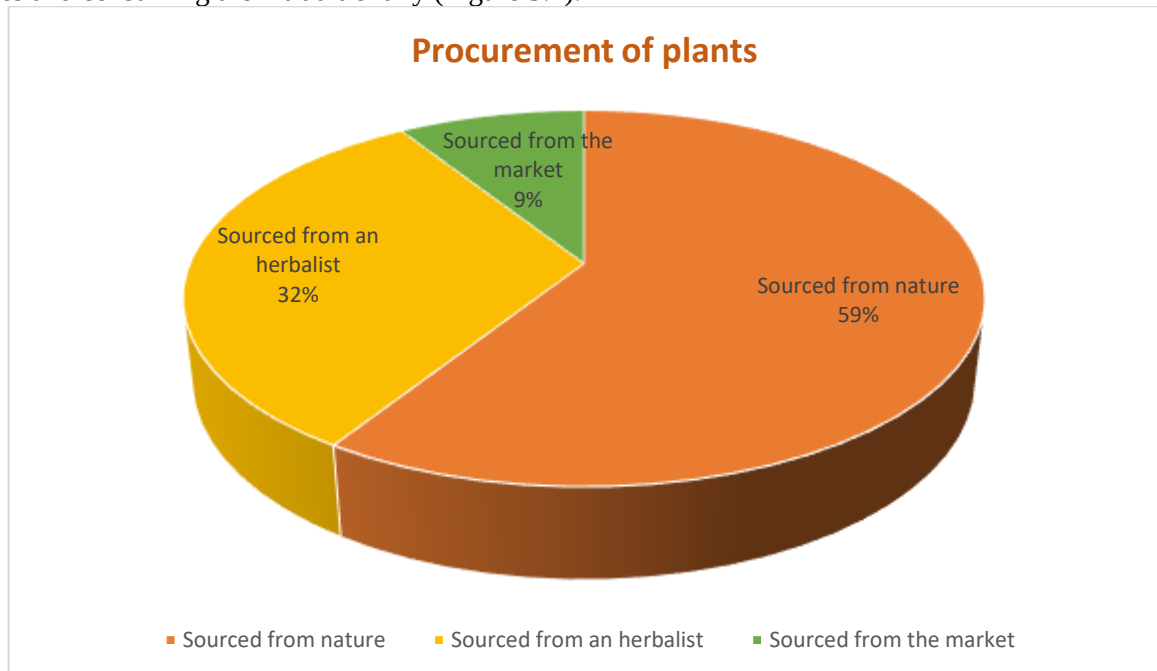


Figure 3.4. Procurement of plants

A large proportion of the products are consumed by consumers as infusion/boiling (79%). In addition, 11% of consumers use them by mixing into foods, 5% as oil, 2% as ointment, while 3% left the question unanswered, and 3% use them by extracting their juice (Figure 3.5).

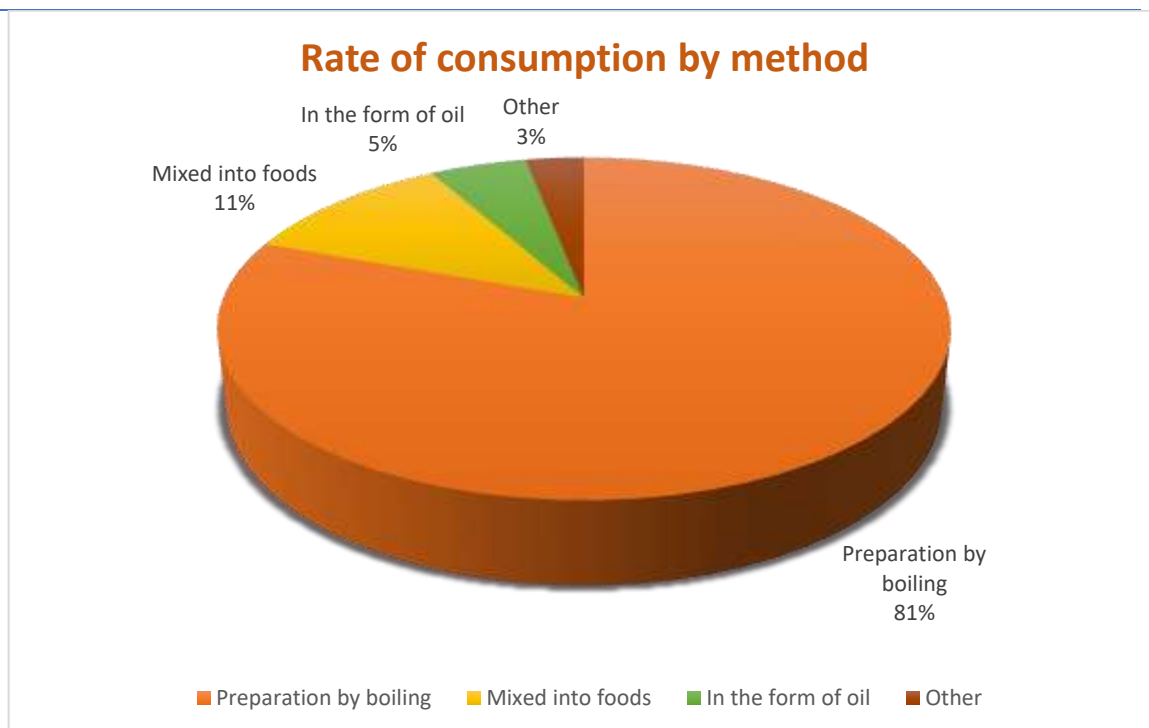


Figure 3.5. Rate of consumption by method

Of the consumers, 82% reported that they benefited from these plants, 14% stated that they benefited slightly, and 4% indicated that they did not benefit at all.

Regarding whether consumers obtained information before using the plants, 44% stated that they received information, 29% indicated that they already knew about some plants, and 18% reported that they did not obtain any information and used them based on prior knowledge.

In terms of perceptions regarding the prices of purchased products, 29% of consumers considered them expensive, 38% normal, 18% cheap, and 15% had no opinion.

In the study conducted by Kayıran and Kırıcı (2019), the identified plants were examined under a microscope, their identification was confirmed, and the used plant parts were determined. It was found that the marketed samples were most commonly used for the treatment of rheumatism, diabetes, cardiovascular diseases, urinary system disorders, cancer, and for weight loss purposes. In the study conducted by Sarı and Öztürk (2023), it was determined through a survey of 48 participants that 193 plant taxa were ethnobotanically used. The landscape value of the identified taxa was evaluated by considering characteristics such as flower, leaf, tissue, form, fruit, coloration, shoot-stem, and scent aesthetics. In the study conducted by Boz et al. (2022), visits

4. Conclusion and Recommendations

Through the conducted study, a database was established on plant taxa with non-wood plant value in the Adana region, including their scientific and vernacular names, endemic status, plant parts used as non-wood forest products, usage areas, and their contributions to the local population. The most common consumption purposes identified in the study were medicinal use, general health, beverages, treatment, and recreation. A strong relationship was found between consumption purposes and consumption periods. When the factors influencing consumption habits were examined, recommendations from close friends were identified as the primary factor. A large proportion of consumers reported benefiting from the products used. However, only a limited portion of consumers had knowledge regarding appropriate dosage.

References

- Akan, H., Korkut, M. M., & Balos, M. M. (2008). An ethnobotanical study in Mount Arat and its surroundings (Birecik, Şanlıurfa, Türkiye). *Firat University Journal of Science and Engineering*, 20(1), 67-81.
- Boz, E., İldeniz, H. K., & Cabi, E. (2022). Some ethnobotanical information from Gönen (Balıkesir) District. *Acta Biologica Turcica*, 35(4), D5:1-17.
- Erdoğan, E. A. (2014). Determination of essential oil contents and investigation of antimicrobial and antimutagenic activities of some plants belonging to the Lamiaceae family. Doctoral dissertation, Mersin University, Mersin, Turkey.
- Faydaoğlu, E., & Sürücüoğlu, M. S. (2011). The use of medicinal and aromatic plants from past to present and their economic importance. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 11(1).
- Kayıran, S. D., & Kırıcı, S. (2019). Herbal drugs for therapeutic purposes sold in herbalists in Adana, Turkey. *Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Agriculture and Nature*, 22(2), 183-192.
- Sarı, D., & Öztürk, Z. (2023). Landscape values of some native plants with ethnobotanical use: The case of Maçka (Trabzon, Türkiye). *Turkish Journal of Forest Science*, 7(2), 189-209. <https://doi.org/10.32328/turkjforsci.1323370>.

**ETHNOBOTANICAL CHARACTERISTICS OF SOME PLANT TAXA IN THE MANISA
(TÜRKİYE) REGION**

Dr. Güliz TÜRKMEÑOĞLU

Alanya Alaaddin Keykubat University, Antalya-Türkiye

Email: guliz.turkmenoglu@alanya.edu.tr

Orcid: 0000-0003-3049-3216

Abstract

Within the scope of this study, it was aimed to identify ethnobotanically used plants based on data obtained through face-to-face interviews conducted with local people in Manisa Province between 2025 and 2026. In this context, 328 individuals were interviewed, and survey studies were carried out. Information regarding the vernacular names, used parts, and local uses of the plants was recorded. As a result of the study, 27 taxa belonging to 15 families with ethnobotanical use in Manisa Province were identified. It was determined that the recorded taxa are used for ethnobotanical purposes such as treatment, health, dye, oil, spice, and food. The most intensive consumption periods of these products were found to be winter and autumn seasons, respectively. A strong relationship was observed between consumption purposes and consumption periods.

Keywords: Ethnobotany, Endemic, Manisa, Turkey

1. Introduction

In recent years, the widespread use of synthetic materials in the food and beverage industry many of which are associated with severe diseases such as cancer has increased the demand for organic and natural products (Akbulut and Bayramoğlu, 2013). Medicinal and aromatic plants have been used in the treatment of diseases since ancient times (Ložienė et al., 2007). Through this study, evaluations were conducted on the demographic and socio-economic structure of the local population in the Manisa region, the consumption purposes of certain non-wood forest products, consumption time, consumption frequency, procurement methods, perceived benefits and side effects of consumed plant-based products, and factors influencing the development of consumption habits. It was determined that these plants are used in various industrial fields in the Manisa region, particularly in food, medicine, and pharmacy, as well as cosmetics. Through such studies, knowledge obtained from local communities can be utilized in public health, and it can be more easily determined which plants can be utilized in specific regions.

2 . Materials and Methods

In this study, a questionnaire consisting of 25 items developed by Korkmaz et al. (2011) was used. The questions and response options included in the questionnaire were designed to obtain information on: (1) the demographic and socio-economic characteristics of consumers, (2) the consumption purposes of non-wood forest products (NWFPs), particularly medicinal plants, (3) consumption time, (4) consumption frequency, (5) procurement methods, (6) perceived benefits and side effects of consumed plant-based products, (7) factors influencing the development of consumption habits, and (8) evaluations of sales points.

During the administration of the questionnaire, participants were preferred to complete the forms individually in order to ensure that they answered the questions without external influence. The evaluation of the questionnaires was carried out by converting the numerical values of the selected response options into percentage distributions.

3. Findings and Discussion

In this study, 27 taxa belonging to 15 families were evaluated. A database was established including the scientific names of these plant taxa, their families, the plant parts used as non-wood forest products, their local uses, the identification of endemic taxa, and contributions from local people (Table 2.1).

Table 2.1. Recorded Species and Their Used Parts

Scientific name	Family	Local name	Part used	Local usage
<i>Allium sativum</i> L.	Amaranthaceae	Sarımsak	Meyve	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
	Amaranthaceae		Yaprak+Gövde	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Spinacia oleracea</i> L.		Ispanak		It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Conium maculatum</i> L.	Apiaceae	Yaprak	Tibbi İlaç	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Asparagus officinalis</i> L.	Asparagaceae	Yabani kuşkonmaz	Meyve	It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Raphanus sativus</i> L.	Brassicaceae	Turpotu	Yaprak	It is used to relieve indigestion and gastric disorders, and acts as an expectorant.
<i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	Elaeagnaceae	İğde	Meyve	It is used in the management of common cold conditions.

<i>Morus alba</i> L.	Moraceae	Dut yaprağı	Yaprak		It is used as a spice and in the management of joint pain.
<i>Teucrium polium</i> L. subsp. <i>polium</i>	Lamiaceae	Acı yavşan	Leaves and flowers		It is used in the management of common cold conditions.
<i>Teucrium chamaedrys</i> L. subsp. <i>chamaedrys</i>	Lamiaceae	Kısamahmut	Leaves and flowers		It is used in the management of common cold conditions.
<i>Sideritis libanotica</i> subsp. <i>linearis</i> (Bentham) Bornm.	Lamiaceae	Dağ çayı	Leaves and flowers		It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Sideritis leptoclada</i> O.Schwarz&P.H. Davis	Lamiaceae	Dağ çayı	Leaves and flowers		It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Salvia fruticosa</i> Mill.	Lamiaceae	Adaçayı	Leaves and flowers		It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Origanum majorana</i> L.	Lamiaceae	Kekik	Leaves and flowers		It is used in the treatment of respiratory and gastrointestinal disorders.
<i>Ocimum basilicum</i> L.	Lamiaceae	Fesleğen	Leaves and flowers		It is used to relieve indigestion and gastric disorders, and acts as an expectorant.
<i>Salvia officinalis</i> L.	Lamiaceae	Adaçayı	Leaves and shoots		It is used in the management of common cold conditions.
<i>Laurus nobilis</i> L.	Lauraceae	Defne	Fruit and leaves		It is used as a spice and in the management of joint pain.
<i>Mentha piperita</i> L.	Lamiaceae	Nane	Leaves and shoots		It is used as a spice and in the treatment of the common cold.
<i>Tilia tomentosa</i> Moench.	Tiliaceae	İhlamur	Fruit		It is used in the management of common cold conditions.
<i>Ceratonia siliqua</i> L.	Fabaceae	Keçiboynuzu	Fruit		It is used in the management of common cold conditions.
<i>Pistacia terebinthus</i> L.	Anacardiaceae	Çitlenbik	Fruit		It is used for recreational purposes and to support the immune system.
<i>Matricaria chamomilla</i> L.	Asteraceae	Papatya	Flowers		It is used as a sedative and for hair lightening.

<i>Rosmarinus officinalis</i> Schleid.	Lamiaceae	Biberiye	Leaves and shoots	It is used as a laxative and to relieve flatulence.
<i>Sideritis condensata</i> L.	Lamiaceae	Dağçayı	Leaves and shoots	It is used for the treatment of the common cold and for recreational purposes.
<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.	Apiaceae	Rezene	Leaves and shoots	It is used to support the digestive system and as a carminative.
<i>Rosa canina</i> L.	Rosaceae	Kuşburnu	Fruit	It is used in the treatment of the common cold and as a marmalade ingredient.
<i>Urtica dioica</i> L.	Urticaceae	Isırganotu	Leaves and shoots	It is used as a food ingredient and as an antipyretic and analgesic agent.
<i>Coriandrum sativum</i> L.	Apiaceae	Kişniş	Leaves, shoots and fruit	It is used for digestive health and recreational purposes.

When the consumption purposes of non-wood forest products are examined, it is observed that their use for general health purposes is predominant (Figure 3.1). In addition, there are also uses for therapeutic and recreational purposes. Of the respondents, 69% use these plants for general health, 13% for treatment, 14% for recreation, and 4% for cosmetic and aesthetic purposes.

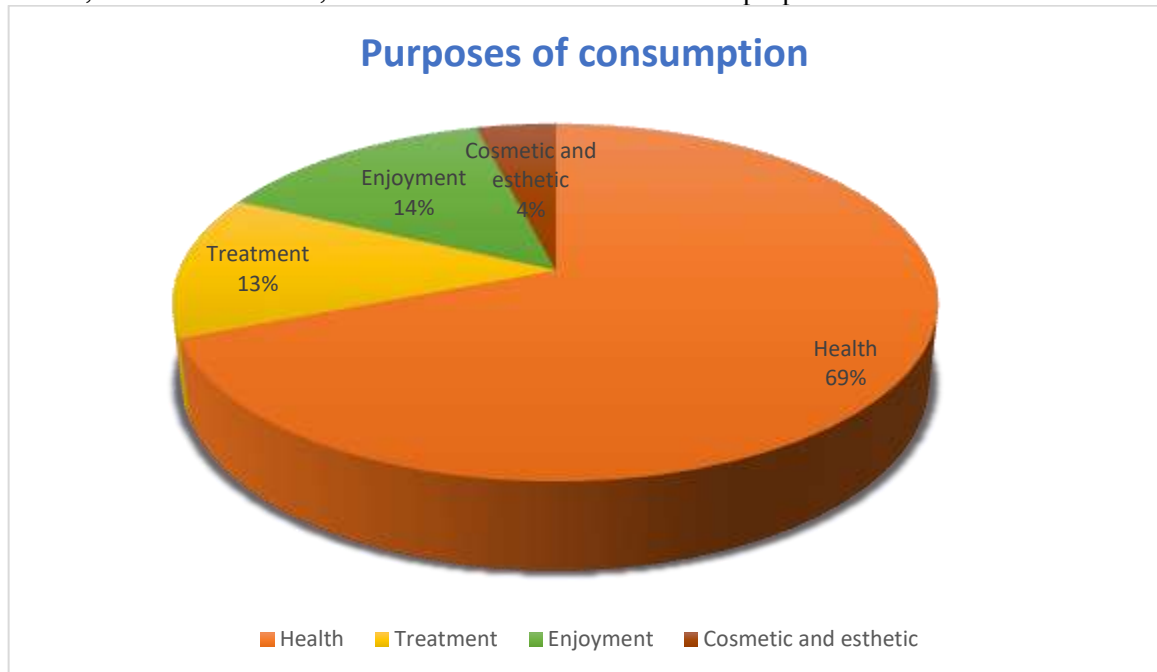


Figure 3.1. Purposes of consumption

In terms of time, the proportion of consumers with a regular consumption habit is presented below (Figure 3.2). Of the respondents, 37% use these products daily, 32% weekly, and 26% monthly, while 5% do not have a regular consumption pattern.

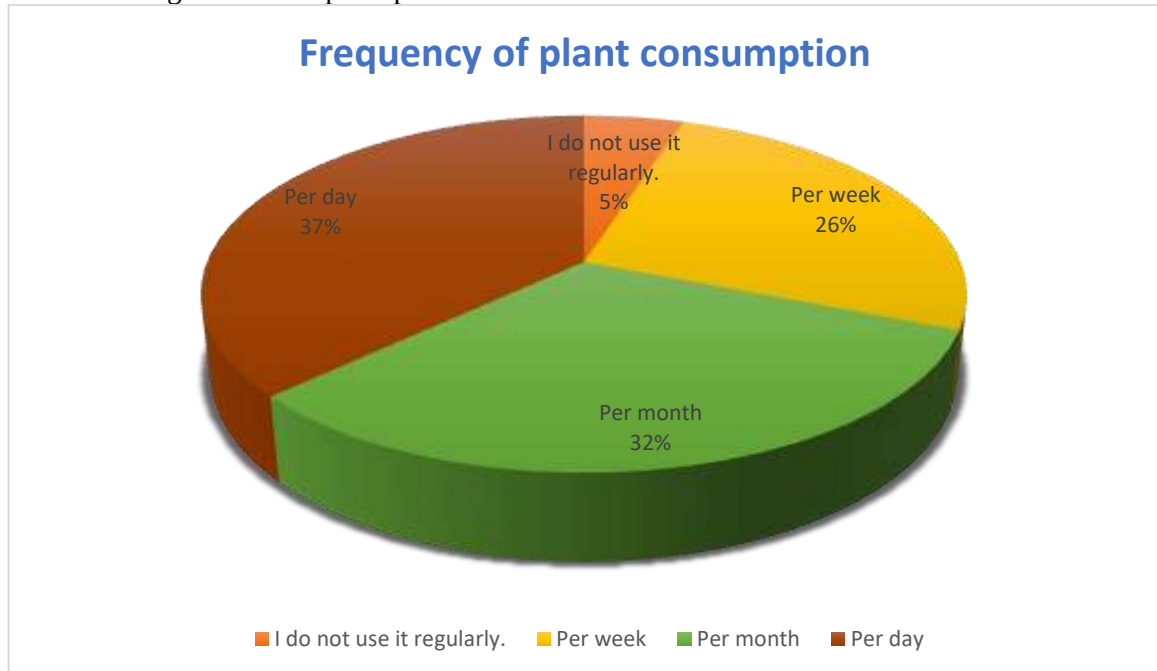


Figure.3.2. Frequency of plant consumption

Regarding the rate of continuous or alternating use of plants, it was found that a large proportion of consumers use different plants intermittently. Of the respondents, 59% reported using the same plants consistently, 25% stated that they occasionally changed the plants they used, and 16% indicated that they used different plants (Figure 3.3).

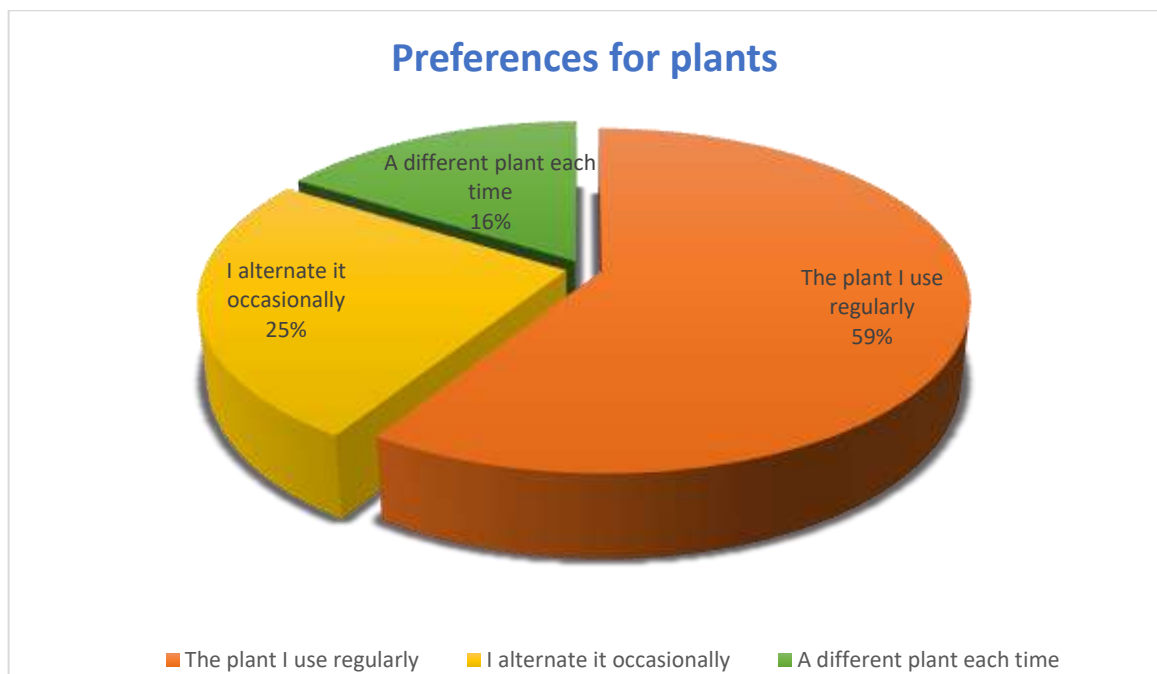


Figure. 3.3. Preferences for plants

Consumers obtain these products from different sources. 61% are collected from nature. Procurement from markets (28%) and herbalists or grocery stores (11%) is at a much lower level. This situation is attributed to the long-standing practice of collecting naturally growing species around villages and consuming them traditionally (Figure 3.4).

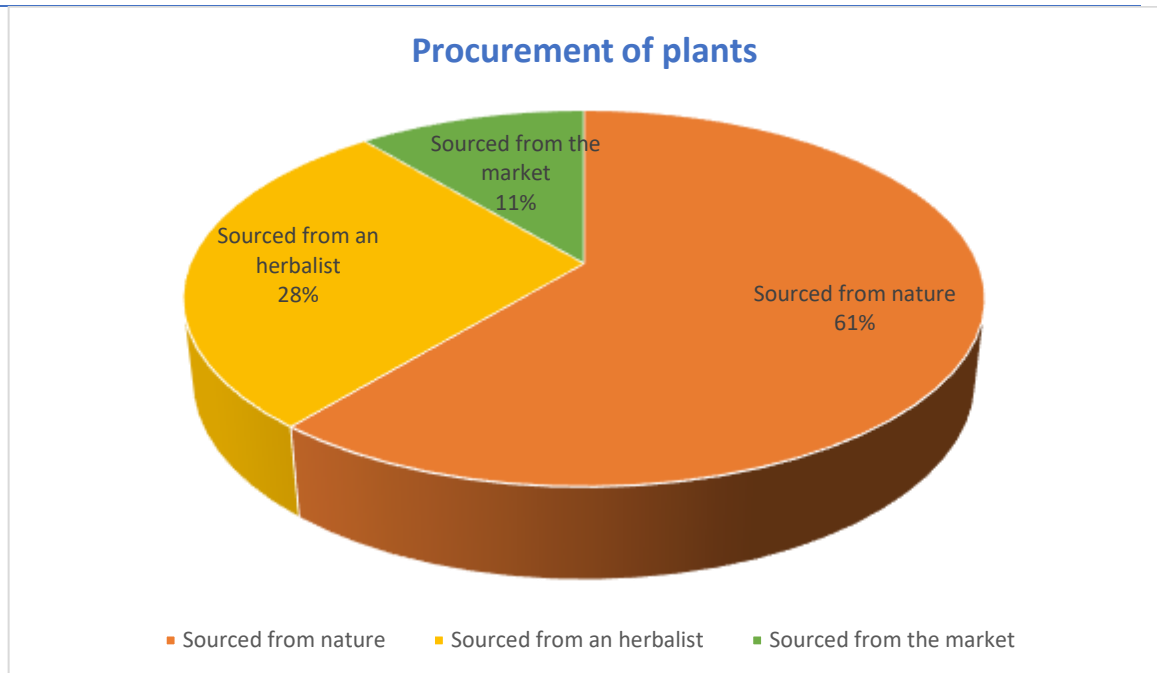


Figure 3.4. Procurement of plants

A large proportion of the products are consumed by consumers as infusion/decoction (68%). In addition, 8% of consumers use them by mixing into foods, 3% as oil, 2% as ointment, while 15% left the question unanswered, and 4% use them by extracting their juice (Figure 3.5).

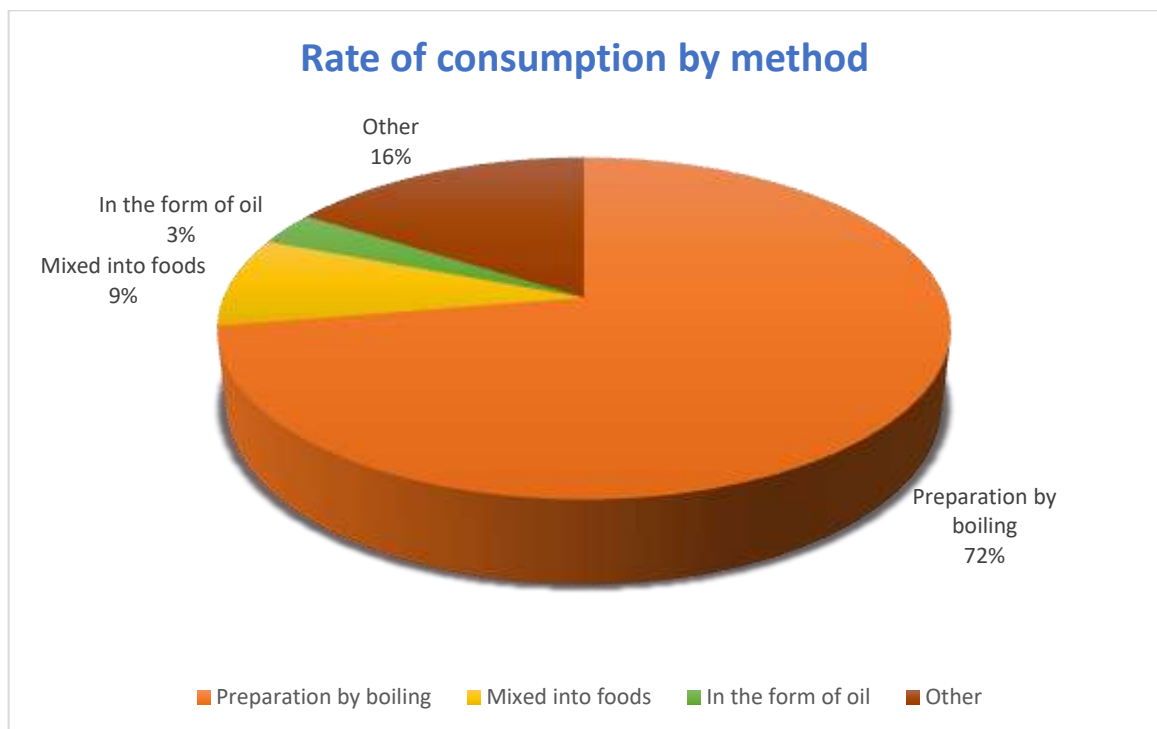


Figure 3.5. Rate of consumption by method

Of the consumers, 79% reported that they benefited from these plants, 18% stated that they benefited slightly, and 3% indicated that they did not benefit at all.

Regarding whether consumers obtained information before using the plants, 49% stated that they received information, 21% indicated that this applied only to some plants, 18% reported that they already knew about them, and 12% stated that they did not obtain information but used them based on prior knowledge.

In terms of perceptions regarding the prices of purchased products, 42% of consumers considered them expensive, 29% normal, 24% cheap, and 5% had no opinion.

4. Conclusion and Recommendations

Through the conducted study, a database was established on plant taxa with non-wood plant value in the Manisa region, including their scientific and vernacular names, endemic status, plant parts used as non-wood forest products, usage areas, and their contributions to the local population. The most common consumption purposes identified in the study were medicinal use, general health, beverages, and treatment. When the factors influencing consumption habits were examined, recommendations from close friends were identified as the primary factor. A large proportion of consumers reported benefiting from the products used. However, only approximately one-third of consumers had knowledge regarding appropriate dosage.

According to Temel et al. (2018), approximately 20 types of medicinal and aromatic plants are cultivated in Türkiye over an area of 1.3 million decares. It was also reported that production areas increased by approximately 40% between 2000 and 2015, and that the foreign trade of medicinal and aromatic plants in 2015 amounted to 280 million USD in exports and 254 million USD in imports. In the study conducted by Karaşah (2025), the aesthetic and functional characteristics of 15 plant species, in addition to their aromatic properties, were examined, along with their other uses in landscape architecture and the ecosystem services they provide. Çelik and Ayran (2020) determined that there is a positive relationship between the total phenolic content of medicinal and aromatic plants and their antioxidant capacities.

References

- Akbulut, S., & Bayramoğlu, M. M. (2014). Reflections of socio-economic and demographic structure of urban and rural populations on the use of medicinal and aromatic plants: The case of Trabzon. *Studies on Ethno-Medicine*.
- Karaşah, B. (2025). Some medicinal and aromatic plants that can be used in smell gardens and the ecosystem services provided by them. *Bahçe*, 54(Special Issue 1), 419-428. DOI: <https://doi.org/10.53471/bahce.1556702>.
- Çelik, S. A., & Ayran, İ. (2020). Some medicinal and aromatic plants as antioxidant sources. *Turkish Journal of Scientific Reviews*, 13(2), 115-125.
- Ložienė, K., Venskutonis, P. R., Šipailienė, A., & Labokas, J. (2007). Radical scavenging and antibacterial properties of extracts from different *Thymus pulegioides* L. chemotypes. *Food Chemistry*, 103(2), 546-559. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.027>.
- Temel, M., Tınmaz, A. B., Öztürk, M., & Gündüz, O. (2018). Production and trade of medicinal and aromatic plants in the world and Turkey. *KSU Journal of Agriculture and Nature*, 21(Special Issue), 198-214.

Sm₂O₃ VE ZrO₂ KATKILARININ Al₂O₃ ESASLI SERAMİKLERİN BALİSTİK PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Tuğba Şanlı

Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences,
Department of Institute of Graduate Studies, Sivas-Türkiye

Email: tugbasanli0921@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-7260-6650>

Doç. Dr. Betül Kafkashoğlu Yıldız

Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences,
Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sivas-Türkiye

Email: bkyildiz@sivas.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6527-2918>

Arş. Gör. Elif Işık

Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences,
Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sivas-Türkiye

Email: elif.isik@sivas.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8289-9512>

Prof. Dr. Yahya Kemal Tür

Gebze Technical University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and
Engineering, Kocaeli

Email: yktur@gtu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9521-8875>

Özet

Bu çalışmada, samaryum oksit (Sm₂O₃) ve zirkonya (ZrO₂) katkılarının alümina (Al₂O₃) esaslı seramiklerin balistik performansına olan etkisi hem ayrı ayrı hem de sinerjik olarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, altıgen formundaki saf Al₂O₃, Al₂O₃-hac.%5ZrO₂, Al₂O₃-hac.%0,8Sm₂O₃ ve Al₂O₃-hac.%5ZrO₂-hac.%0,8Sm₂O₃ kompozisyonuna sahip numuneler, kuru presleme ve sonrasında uygulanan soğuk izostatik presleme süreçleri kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemiyle tespit edilmiştir. Balistik performansın değerlendirilebilmesi amacıyla, STANAG 4569 Seviye 1 standardı esas alınarak penetrasyon derinliği (DOP) testi gerçekleştirilmiş olup arka destek malzemesi olarak polikarbonat plaka kullanılmıştır. Balistik testler sırasında, destek plaka üzerine yerleştirilmiş seramik numuneler üzerine, 15 m mesafeden 839 ± 10 m/s atış hızındaki 7,62x51 mm NATO Ball mermisiyle atış gerçekleştirilmiştir. DOP testi sonrasında merminin penetrasyon derinliğini ve destek plakadaki deformasyonu, test öncesinde de numunelerdeki yapısal kusurların tespiti için X-ışını bilgisayarlı tomografi (XCT) analizleri yapılmıştır. Balistik testler sonucunda, Al₂O₃-hac.%0,8Sm₂O₃ numunelerinin diğer numunelere kıyasla daha iyi balistik performans sergilediği görülmüştür. Merminin numune yüzeyine çarpmasından kaynaklanan destek plakada oluşan deformasyon miktarı değerlendirildiğinde, en düşük deformasyonun Al₂O₃-hac.%0,8Sm₂O₃ (14 mm) seramiklerde, en yüksek deformasyonun ise Al₂O₃-hac.%5ZrO₂-hac.%0,8Sm₂O₃ (16,55 mm) seramiklerde olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda seramik malzemelerde balistik performansın değerlendirilmesinde kullanılan balistik verimlilik faktörü hesaplamaları sonucunda da, en yüksek verimlilik faktörü (3,19) Al₂O₃-hac.%0,8Sm₂O₃ numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuç, deneysel bulgular ile hesaplamaların uyumlu olduğunu ortaya koymakta olup, Al₂O₃-hac.%0,8Sm₂O₃ kompozisyonunun hafif zırhlı araç uygulamaları için potansiyel bir aday olduğunu göstermektedir. (Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122M179 Numaralı proje ile desteklenmiştir.)

Anahtar Kelimeler: Al₂O₃, ZrO₂, Sm₂O₃, Balistik Performans

**THE EFFECT OF Sm₂O₃ AND ZrO₂ ADDITIVES ON THE BALLISTIC PERFORMANCE
OF Al₂O₃-BASED CERAMICS**

Abstract

In the present study, the ballistic performance of alumina (Al₂O₃)-based ceramics was evaluated with the addition of samarium oxide (Sm₂O₃) and zirconia (ZrO₂), both individually and in synergistic combinations. In this regard, the hexagonal form of pure Al₂O₃, Al₂O₃-5vol.% ZrO₂, Al₂O₃-0.8vol.%Sm₂O₃, and Al₂O₃-5vol.%ZrO₂-0.8vol.%Sm₂O₃ samples were prepared utilizing dry pressing followed by cold isostatic pressing processes. The densities of the prepared samples were determined using the Archimedes method. The penetration depth (DOP) test was carried out based on the STANAG 4569 Level 1 standard to evaluate ballistic performance, using a polycarbonate plate as the backstop material. During ballistic testing, 7.62x51 mm NATO Ball projectiles were fired at a velocity of 839 ± 10 m/s from a distance of 15 m at ceramic samples placed on a support plate. Following the DOP test, X-ray computed tomography (XCT) analyses were used to determine the penetration depth of the bullet and the deformation of the backing plate, while the samples were also examined for structural defects before the test. The results of the ballistic tests showed that the Al₂O₃-0.8vol.%Sm₂O₃ samples exhibited better ballistic performance compared to the other samples. When the deformation occurring in the backing plate due to the impact of the projectile on the sample surface was evaluated, it was determined that the lowest deformation was observed in the Al₂O₃-0.8vol.%Sm₂O₃ ceramics (14 mm), whereas the highest deformation occurred in the Al₂O₃-5vol.%ZrO₂-0.8vol.%Sm₂O₃ ceramics (16.55 mm). At the same time, calculations of the ballistic efficiency factor, used to evaluate the ballistic performance of ceramic materials, revealed that the highest efficiency factor (3.19) was obtained for the Al₂O₃-0.8vol.%Sm₂O₃ samples. This result reveals that the experimental findings are consistent with the calculations, indicating that the Al₂O₃-0.8vol.%Sm₂O₃ composition is a potential candidate for lightweight armored vehicle applications. (This study was supported by the Scientific and Technical Research Council of Turkey - TUBITAK through project no 122M179.)

Keywords: Al₂O₃, ZrO₂, Sm₂O₃, Ballistic Performance

1. Introduction

Alumina (Al_2O_3)-based ceramics are among the most widely used engineering ceramics in ballistic protection systems owing to their high hardness, excellent wear resistance, chemical stability, relatively low density, and cost-effectiveness (Krishnan et al., 2021). In particular, their high hardness and compressive strength enable them to induce deformation and fragmentation in the projectile, making Al_2O_3 -based ceramics promising candidates for lightweight armor applications (Dresch et al., 2021; Krishnan et al., 2021).

However, the brittle nature of Al_2O_3 ceramics may adversely affect their ballistic response. Although the high hardness of Al_2O_3 contributes to the fragmentation of the projectile core, its relatively low fracture toughness limits the activation of energy-dissipating mechanisms such as crack deflection. Consequently, under impact loading, the ceramic may undergo catastrophic failure, which restricts its overall ballistic resistance. Therefore, improving ballistic performance requires controlling impact-induced damage and increasing the fracture energy of the ceramic structure (Andraskar et al., 2022; Dresch et al., 2021; Jiusti et al., 2017; Krishnan et al., 2021). Accordingly, the incorporation of secondary additives has been widely regarded as an effective strategy for improving the ballistic performance of Al_2O_3 -based ceramics (Andraskar et al., 2022; Santos et al., 2018). In the present study, secondary additives will be incorporated to improve the ballistic performance of Al_2O_3 ceramics, with zirconium dioxide (ZrO_2) and samarium oxide (Sm_2O_3) selected as the additive phases.

The incorporation of ZrO_2 can reduce the stress field at the crack tip through the transformation toughening mechanism, thereby slowing crack propagation and improving fracture toughness (Li et al., 2024). As a result, the stress waves generated during projectile impact can be distributed over a wider area, which may help prevent the sudden fragmentation of the ceramic structure (Savio & Madhu, 2018). Sm_2O_3 , on the other hand, is a rare-earth oxide that is considered to have the potential to enhance the fracture toughness of Al_2O_3 and, consequently, its ballistic performance (Shi et al., 2020).

The determination of ballistic performance in ceramic materials is a highly complex process, as it involves the evaluation of several parameters, such as projectile velocity, projectile geometry, ceramic type, sample geometry and dimensions, firing distance, impact velocity, and the type and thickness of the backing material (Madhu et al., 2005). Therefore, various testing methods, (depth of penetration (DOP) test, V50 ballistic limit test, non-deforming penetration test, and semi-infinite penetration test), have been employed to assess ballistic performance. Among these methods, the DOP test is one of the simplest and most widely used approaches for evaluating the ballistic performance of ceramic materials. This method is primarily based on measuring the penetration depth of a projectile in the presence and absence of the ceramic material. By comparing these two penetration depths, the ballistic performance of the ceramic material can be quantitatively assessed (Dresch et al., 2021; Madhu et al., 2005; Savio & Madhu, 2018).

Wade et al. compared the ballistic performance of ZTA ceramics containing 15 wt.% nano- ZrO_2 with that of pure Al_2O_3 ceramics using the depth of penetration (DOP) test. Although the ZTA ceramics exhibited higher fracture toughness, the DOP test results indicated that they did not provide a significant ballistic advantage over pure Al_2O_3 (Wade-Zhu et al., 2021). Khan et al. experimentally and numerically investigated the fracture, fragmentation, and energy absorption behavior of Al_2O_3 ceramic specimens subjected to different impact velocities ranging from 122 to 290 m/s. Their findings showed that ceramic thickness and target geometry play a critical role in determining the damaged area, residual velocity, and penetration behavior (Khan & Iqbal, 2022). Cura et al. fabricated laminated ceramic systems composed of Al_2O_3 , SiC, and B_4C with different geometrical configurations, including hexagonal and square designs, and evaluated their ballistic performance relative to monolithic ceramic structures using the depth of penetration (DOP) test. The results demonstrated that the monolithic ceramic structures exhibited superior ballistic performance compared with the laminated configurations (Cura et al., 2024).

In this study, ballistic samples containing ZrO_2 and Sm_2O_3 additives were produced by the dry pressing method to improve the ballistic performance of Al_2O_3 ceramics. The ballistic performance of the fabricated samples was evaluated using the depth of penetration (DOP) test, and the composition exhibiting the most favorable ballistic response was determined.

2. Materials and Methods

The main ceramic powders used in the study are α - Al_2O_3 (Alpha Aesar, 99.95% purity, 0.25-0.45 μm), Sm_2O_3 (Nanography, 99.95% purity, 50 nm), and 3 mol% yttria-stabilized ZrO_2 (MSE Technology, <0.5 μm). Polyacrylic acid (Darvan 821A, MSE Tech Co., Ltd.) was added as a dispersant to improve suspension homogeneity. The binder system consisted of glycerol (Sigma-Aldrich) as a plasticizer and polyvinyl alcohol (Sigma-Aldrich) as a binder. This study examined the ballistic performance of compositions of pure Al_2O_3 , Al_2O_3 - 0.8vol.% Sm_2O_3 , Al_2O_3 - 5vol.% ZrO_2 , and Al_2O_3 - 5vol.% ZrO_2 - 0.8vol.% Sm_2O_3 . For this purpose, the powders to be used in the production of ballistic samples were prepared. The mixture, including ceramic powder and a dispersant, was mixed in a ball mill with Al_2O_3 balls in distilled water for 24 hours. Simultaneously prepared binder stock solution (2wt.% polymer) was added to the ball-milled mixture. After the prepared powders were ground and sieved, the samples were shaped in a uniaxial press under 35 MPa pressure. Afterwards, the hexagonal-shaped samples were pressed in a cold isostatic press at a pressure of 200 MPa. After the shaping process, all samples were gradually heated to 600°C at a rate of 1°C/min, subjected to a binder burn-out for 1 hour, and sintered pressurelessly in air at 1550°C (at a heating rate of 2°C/min). Figure 1 shows the stainless-steel die used in production and the dimensions of the produced samples.

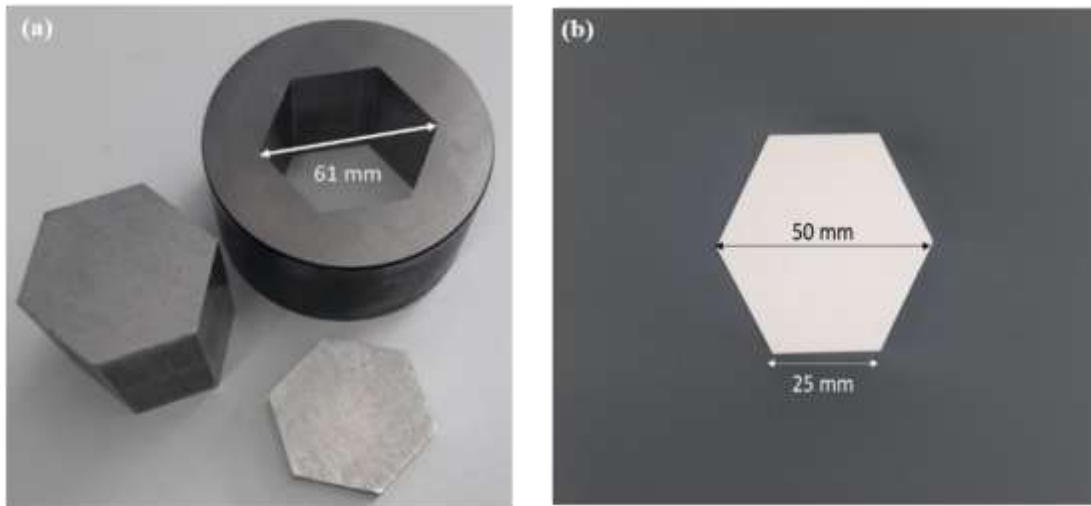


Figure 1. (a) Die used in sample production (b) Sample dimensions after sintering

The bulk density values were determined using the Archimedes method. The ballistic performance was evaluated based on the results of the DOP tests. The DOP tests were performed at Kayseri Advanced Materials Industry and Technology Inc. (KIM TECHNOLOGIES) according to the STANAG 4569 Level 1 standard. The samples (a total of 7 samples, consisting of 1 in the center and 6 around it) were placed on a polycarbonate backing plate and fixed with a polymer adhesive before the ballistic test. Subsequently, the top layer was coated with glass fiber to prevent the samples from spreading during the shot. Figure 2 presents the sample preparation process for the DOP test.

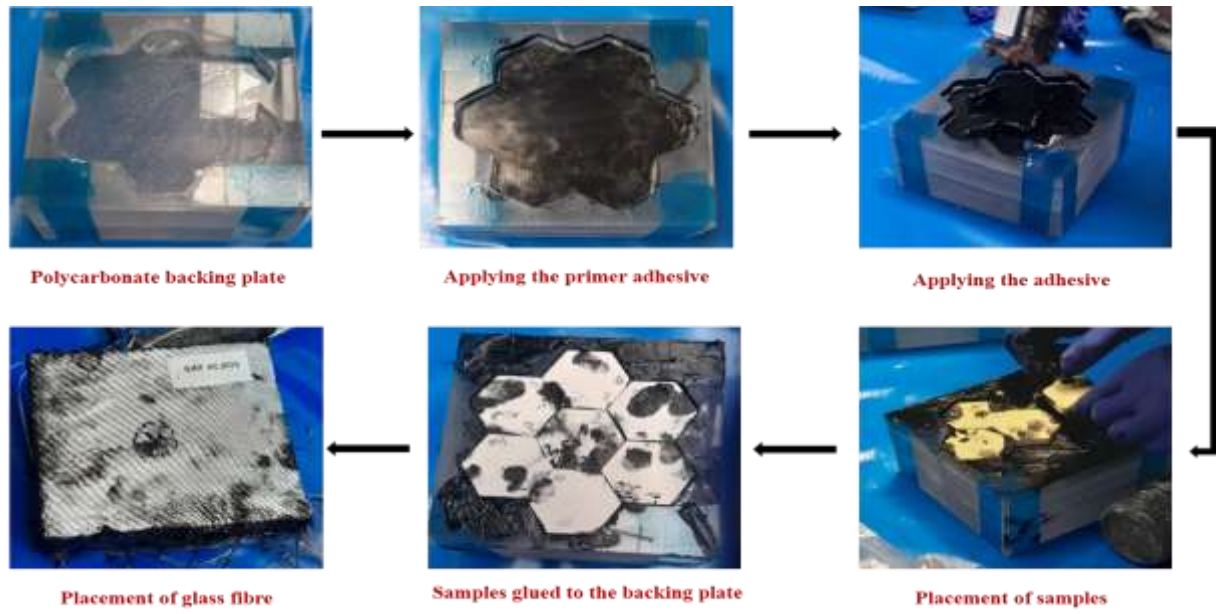


Figure 2. The process of preparing samples for ballistic tests.

During the DOP tests, shots were taken from a distance of 15 m at a speed of 839 ± 10 m/s using the 7.62 x 51 mm NATO Ball bullet shown in Figure 3 (c). Laser alignment was performed to ensure that the shots hit the exact center of the target. A total of 2634 g of gunpowder was used in the tests to achieve the target bullet velocity. Figure 3(a) and (b) shows the shooting setup used for the DOP tests. Before the DOP test, an XCT scan was carried out to determine any production-related cracks and defects in the test samples. Meanwhile, following the ballistic tests, the penetration depth and the diameter of the crater created by the bullet were determined using a 3D XCT scan.

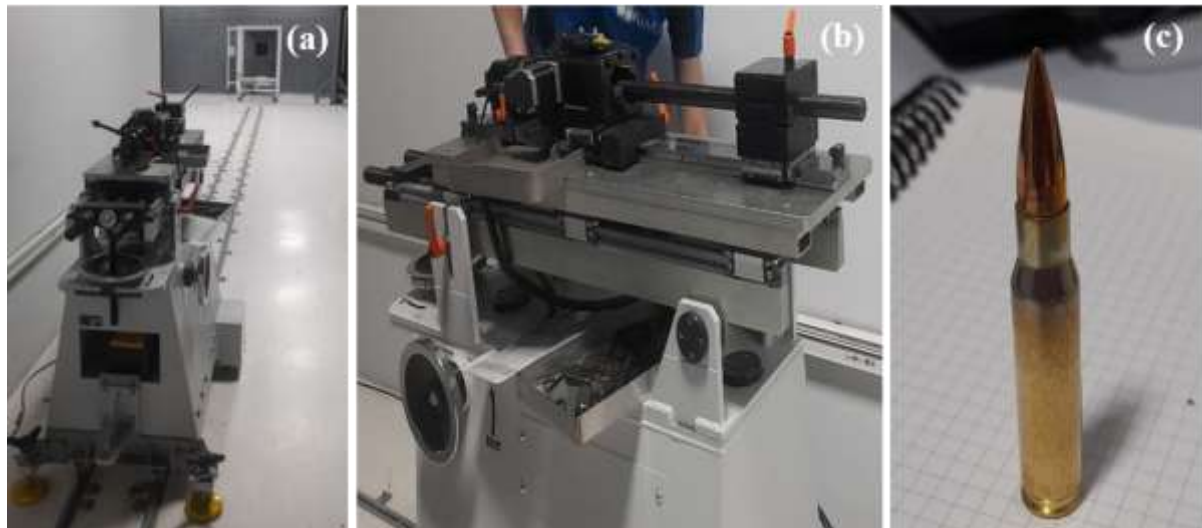


Figure 3. (a) DOP test setup, (b) shooting setup, and (c) 7.62 x 51 mm NATO Ball bullet

The ballistic efficiency of the samples was evaluated based on the differential efficiency factor (Δec) equation shown in Equation 1 (Fejdyš et al., 2021; Savio & Madhu, 2018).

$$\Delta ec = \frac{\rho_b \cdot (P_0 - P_b)}{\rho_c \cdot t} \quad (1)$$

where ρ_b is the density of the backing plate, ρ_c is the ceramic material density, t is the thickness of the ceramic, P_0 is the penetration depth in the backing plate without ceramic material, and P_b is the penetration depth in the backing plate in the presence of the ceramic material.

3. Findings and Discussion

The experimental densities of the fabricated ballistic samples were determined using the Archimedes method, and the density measurement results are presented in Table 1. The results indicate that relative density values above 98% were achieved for all compositions. The highest relative density was obtained for the Al_2O_3 –5vol.% ZrO_2 sample, with a value of $99.4 \pm 0.2\%$, while the pure Al_2O_3 sample exhibited a relative density of $99.1 \pm 0.3\%$. The relative density decreased to $98.8 \pm 0.2\%$ for the Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3 sample, whereas the hybrid Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3 –5vol.% ZrO_2 sample showed the lowest value, at $98.4 \pm 0.2\%$. These findings suggest that the addition of ZrO_2 promotes densification, whereas the incorporation of Sm_2O_3 , particularly in combination with ZrO_2 , slightly reduces the densification behavior. Nevertheless, the fact that all samples exhibited relative density values above 98% indicates that high-density ceramic armor samples suitable for ballistic testing were successfully produced.

Table 1. Relative density values for ballistic test samples.

Composition	Relative density (%)
Al_2O_3	99.1 ± 0.3
Al_2O_3 -5vol.% ZrO_2	99.4 ± 0.2
Al_2O_3 -0.8vol.% Sm_2O_3	98.8 ± 0.2
Al_2O_3 -0.8vol.% Sm_2O_3 -5vol.% ZrO_2	98.4 ± 0.2

Figure 4 presents the XCT images of the ceramic armor samples before ballistic testing. Prior to the tests, XCT analysis was performed to detect possible processing-induced cracks and pores within the samples. The images showed no distinct cracks or porosity in the pure Al_2O_3 samples, whereas localized crack formation was detected in some regions of the Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3 samples. In the Al_2O_3 – ZrO_2 – Sm_2O_3 samples, the formation of cracks and pores became more evident. Such defects may act as stress concentration sites during impact, facilitating damage propagation and limiting ballistic efficiency. To evaluate the effect of composition on ballistic performance more reliably, the samples in which cracks or pores were detected were excluded from the ballistic tests. Instead, reserve samples were also subjected to XCT examination, and only defect-free samples were selected for testing.

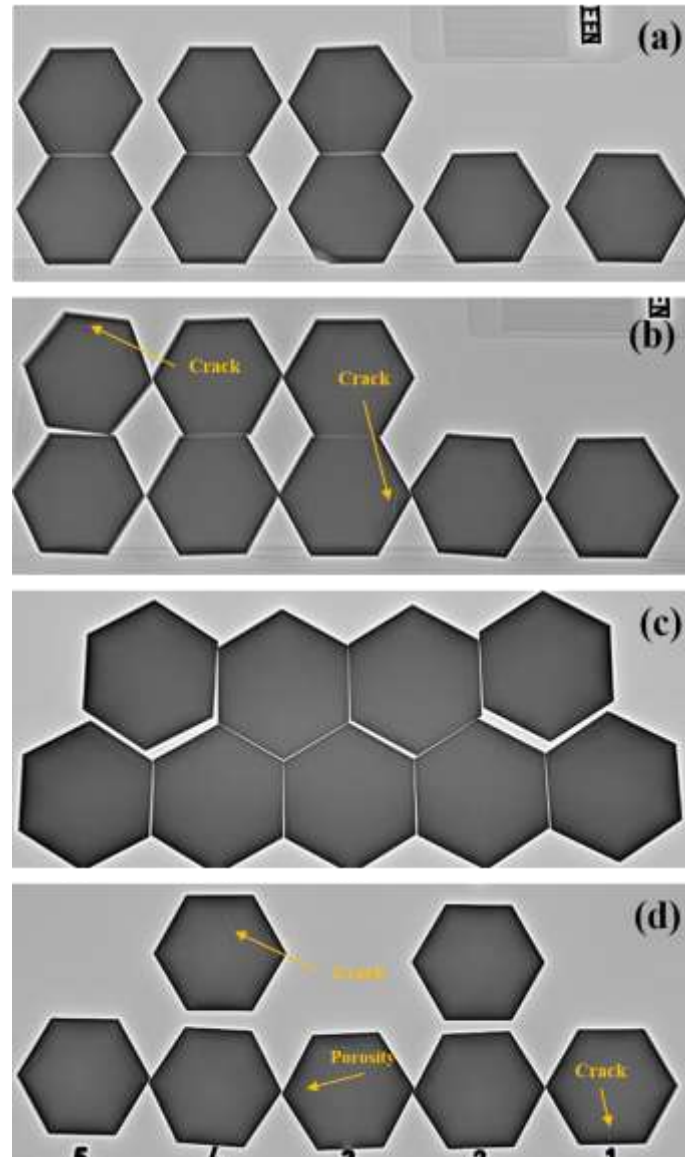


Figure 4. XCT scan results before ballistic tests: (a) Pure Al_2O_3 , (b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Sm}_2\text{O}_3$, (c) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ and (d) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-Sm}_2\text{O}_3$

Figure 5 presents the images and corresponding values of the penetration depth and crater diameter formed after the DOP test for different compositions. Based on the obtained data, the effect of ceramic composition on ballistic performance was evaluated. In this study, the amount of deformation caused by the projectile on the backing plate and the diameter of the crater formed on the ceramic armor surface were determined after the DOP test. Penetration depth is one of the most critical parameters in evaluating ballistic performance using the DOP test. It directly indicates the extent to which the ceramic armor can dissipate projectile energy and the level of damage transferred to the backing plate. The lowest penetration depth, 14 mm, was obtained for the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}0.8\text{vol.}\%\text{Sm}_2\text{O}_3$ ceramic composite sample. This result indicates that the addition of 0.8vol.% Sm_2O_3 improved the ballistic resistance of the Al_2O_3 ceramic and limited the transfer of impact energy to the backing plate. For the pure Al_2O_3 sample, the penetration depth was measured as 16 mm, whereas this value increased to 17 mm for the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ sample. In addition, the widest crater diameter, 28 mm, was observed in the same sample. This finding suggests that the addition of 5 vol.% ZrO_2 did not improve the ballistic performance under the present testing conditions. In the hybrid $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-Sm}_2\text{O}_3$ ceramic composite, the penetration depth and crater diameter were determined as 16.55 mm and 19.19 mm, respectively. Although the hybrid sample exhibited a smaller crater diameter, its higher penetration depth compared to the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}0.8\text{vol.}\%\text{Sm}_2\text{O}_3$

sample indicates lower ballistic effectiveness. Therefore, according to the DOP test results, Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3 was identified as the most successful composition.

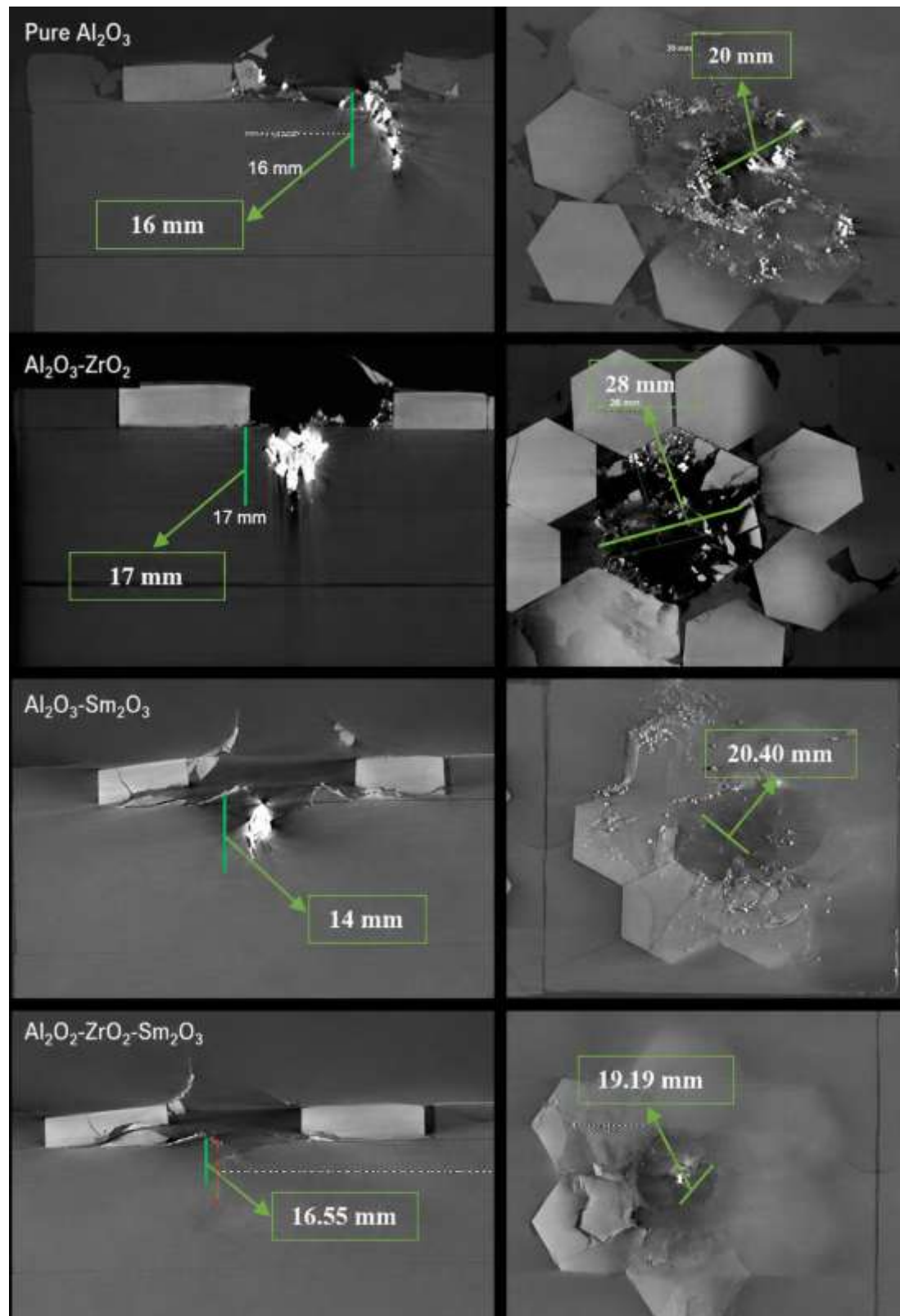


Figure 5. Penetration depth and crater diameters of ballistic test samples

In addition to the experimentally conducted ballistic tests, differential efficiency factors were also calculated to evaluate the ballistic efficiency of the ceramic armor samples. The calculated results are presented in Table 2. A higher efficiency factor indicates that the tested ceramic armor system more effectively restricts projectile penetration. In this regard, the obtained results are consistent with the experimental findings, and the highest ballistic efficiency ($\Delta_{ec} = 3.19$) was achieved for the Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3 sample. This result demonstrates that the incorporation of Sm_2O_3 reduces penetration in Al_2O_3 -based ceramics under ballistic impact. The pure Al_2O_3 sample also exhibited a comparable performance, with an efficiency factor of 3.18. Overall, the differential efficiency factor calculations confirm that Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3 is the most successful composition among the investigated samples in terms of ballistic performance.

Table 2. Properties of ceramic composite samples based on differential efficiency factor values calculated using data obtained from DOP tests.

Sample	Archimedes Density (g/cm ³)	Projectile Velocity (m/s)	Pb (cm)	t (cm)	Δ_{ec}	Crater Diameter (mm)
Al_2O_3	3.95	843	1.578	0.79	3.18	20
Al_2O_3 –5vol.% ZrO_2	4.03	842	1.667	0.78	3.12	28
Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3	4.00	834	1.655	0.78	3.15	19
Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3 –5vol.% ZrO_2	3.97	826	1.387	0.80	3.19	20

After the ballistic tests, fracture surface SEM images taken from the impact-exposed regions of the tested samples are presented in Figure 6. According to the fracture surface SEM observations, both the pure Al_2O_3 and Al_2O_3 –5vol.% ZrO_2 samples exhibited a mixed fracture behavior, involving both transgranular and intergranular fracture modes. In the Al_2O_3 –0.8vol.% Sm_2O_3 sample, transgranular fracture was predominantly observed, whereas intergranular fracture behavior was found to be dominant in the Al_2O_3 –5vol.% ZrO_2 –0.8vol.% Sm_2O_3 sample.

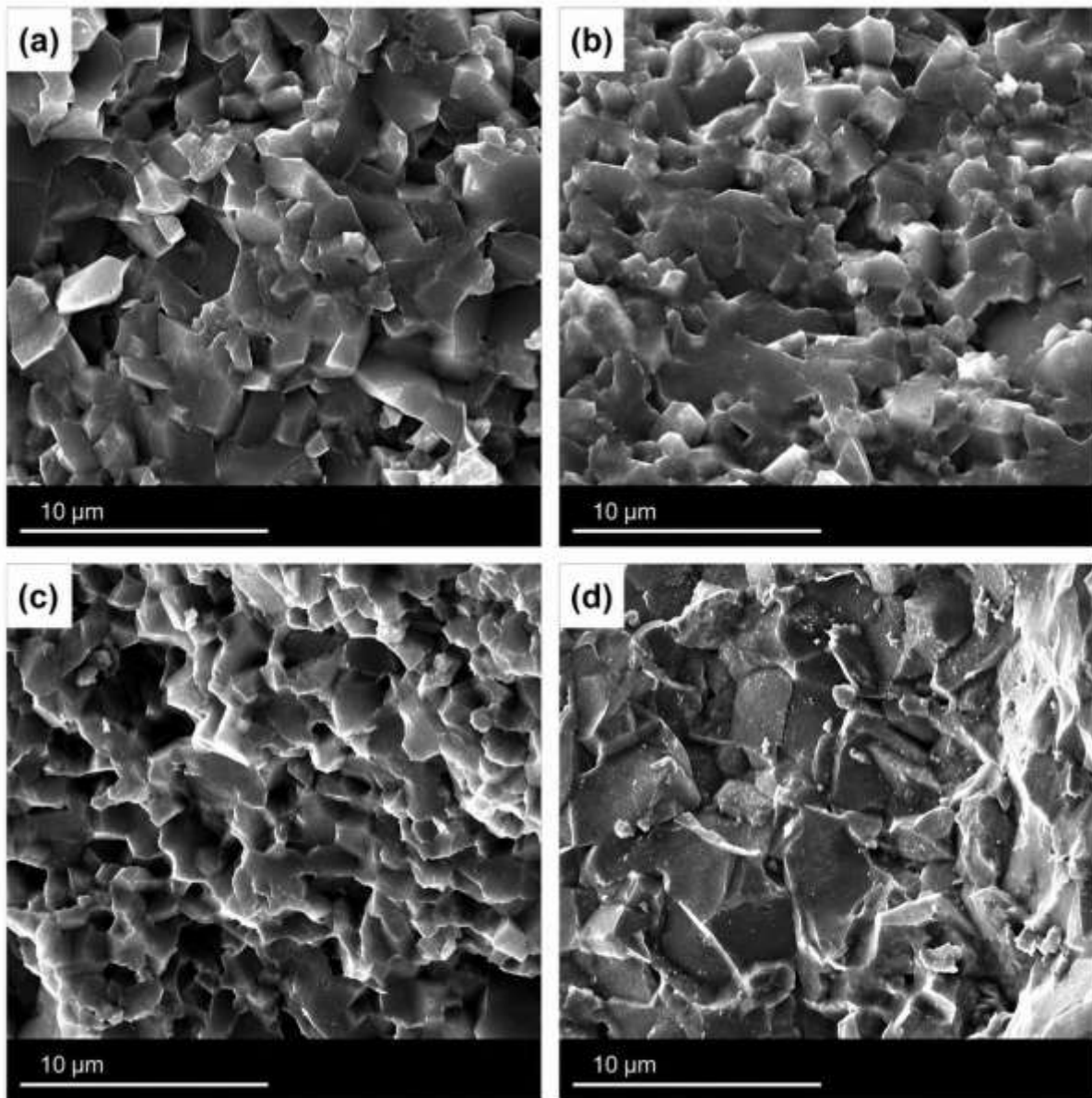


Figure 6. SEM images of fracture surfaces after ballistic testing: a) pure Al₂O₃, b) Al₂O₃-5vol.% ZrO₂, c) Al₂O₃-5vol.% ZrO₂-0.8vol.% Sm₂O₃, d) Al₂O₃-0.8vol.% Sm₂O₃

4. Conclusion

In this study, the effects of Sm₂O₃ and ZrO₂ additions on the ballistic performance of Al₂O₃-based ceramics were systematically investigated. Hexagonal ceramic armor samples were successfully produced by dry pressing followed by cold isostatic pressing, and all compositions exhibited high relative density values above 98%, indicating that dense ceramic bodies suitable for ballistic testing were obtained. Among the investigated compositions, the Al₂O₃-0.8vol.%Sm₂O₃ sample showed the most favorable ballistic response, with the lowest penetration depth of 14 mm and the highest differential efficiency factor of 3.19. This result indicates that the addition of a small amount of Sm₂O₃ improves the ability of Al₂O₃ ceramics to resist projectile penetration and limit the transfer of impact energy to the backing plate.

In contrast, the incorporation of 5 vol.%ZrO₂ did not lead to an improvement in ballistic performance under the present test conditions, despite its relatively high densification behavior. Similarly, the hybrid Al₂O₃-5 vol.% ZrO₂-0.8vol.%Sm₂O₃ composition did not exhibit a synergistic improvement, showing higher penetration depth than the Sm₂O₃-only composition. Fracture surface SEM observations further revealed that the Al₂O₃-0.8vol.%Sm₂O₃ sample predominantly exhibited transgranular fracture

behavior. Overall, the experimental DOP results and calculated ballistic efficiency factors consistently demonstrated that Al_2O_3 -0.8vol.% Sm_2O_3 is the most promising composition among the studied samples for lightweight armor applications.

Acknowledgement

This work was supported by the Scientific and Technical Research Council of Turkey - TUBITAK through project no 122M179. The authors also thank Kayseri Advanced Materials Industry and Technology Inc. for the assistance in performing the ballistic tests for this work.

References

- Andraskar, N. D., Tiwari, G., & Goel, M. D. (2022). Impact response of ceramic structures - A review. In *Ceramics International* (Vol. 48, Number 19, pp. 27262–27279). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.313>
- Cura, M., Tanabi, H., & Sabuncuoglu, B. (2024). Experimental and numerical study on the ballistic performance of laminated ceramics. *International Journal of Impact Engineering*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.105032>
- Dresch, A. B., Venturini, J., Arcaro, S., Montedo, O. R. K., & Bergmann, C. P. (2021). Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review. *Ceramics International*, 47(7), 8743–8761. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2020.12.095>
- Fejdyś, M., Kośla, K., Kucharska-Jastrzębek, A., & Łandwijt, M. (2021). Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic–multi-layered UHMWPE composite armour. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 57(1), 149–161. <https://doi.org/10.1007/s41779-020-00516-7>
- Justi, J., Kammer, E. H., Neckel, L., Lóh, N. J., Trindade, W., Silva, A. O., Montedo, O. R. K., & De Noni, A. (2017). Ballistic performance of Al_2O_3 mosaic armors with gap-filling materials. *Ceramics International*, 43(2), 2697–2704. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.11.087>
- Khan, M. K., & Iqbal, M. A. (2022). Failure and fragmentation of ceramic target with varying geometric configuration under ballistic impact. *Ceramics International*, 48(18), 26147–26167. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.297>
- Krishnan, S. V., Ambalam, M. M., Venkatesan, R., Mayandi, J., & Venkatachalapathy, V. (2021). Technical review: Improvement of mechanical properties and suitability towards armor applications – Alumina composites. In *Ceramics International* (Vol. 47, Number 17, pp. 23693–23701). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.146>
- Li, J., Cai, Q., Luo, G., Zhong, X., Shen, Q., Tu, R., Guo, X., & Ding, R. (2024). Zirconia Toughened Alumina Ceramics via Forming Intragranular Structure. *Materials*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/ma17061309>
- Madhu, V., Ramanjaneyulu, K., Bhat, T. B., & Gupta, N. K. (2005). An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 32, 337–350.
- Santos, J. L. Dos, Marçal, R. L. S. B., Jesus, P. R. R. De, Gomes, A. V., Lima, É. P., Navarro Da Rocha, D., Santos, M. A. P. Dos, Nascimento, L. F. C., Monteiro, S. N., & Louro, L. H. L. (2018). Mechanical properties and ballistic behavior of LiF-added Al_2O_3 -4 wt% Nb_2O_5 ceramics. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 592–597. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.005>
- Savio, S. G., & MAdhu, V. (2018). Ballistic performance evaluation of ceramic tiles with respect to projectile velocity against hard steel projectile using DOP test. *International Journal of Impact Engineering*, 113, 161–167.
- Shi, S., Cho, S., Goto, T., & Sekino, T. (2020). Ti and SmAlO_3 co-affected Al_2O_3 ceramics: Microstructure, electrical and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 835. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.155427>
- Wade-Zhu, Y., Wade-Zhu, J., Wu, H., Binner, J., & Vaidhyanathan, B. (2021). The ballistic impact performance of nanocrystalline zirconia-toughened alumina (nZTA) and alumina ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(2), 1427–1437. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.068>

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF MICROWAVE-ASSISTED
PTCO/GRAPHENE CORE-SHELL CATALYSTS FOR PROTON EXCHANGE MEMBRANE
FUEL CELLS**

Şeyma YALÇINKAYA

Kocaeli University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering,
Kocaeli-Türkiye

Email: seymayalcinkaya@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-0179-5734>

Doç. Dr. Ramiz Gültekin AKAY

Kocaeli University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering,
Kocaeli-Türkiye

Email: gultekin.akay@kocaeli.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6625-4044>

Dr. Çiğdem KARADAĞ

TÜBİTAK Marmara Research Center (MAM), Hydrogen and Fuel Cell Technologies Research
Group, Kocaeli-Türkiye

Email: cigdem.karadag@tubitak.gov.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9553-6419>

ABSTRACT

Acidic medium corrosion, along with the dissolution and agglomeration of platinum nanoparticles, which the cathode electrode layer is exposed to in proton exchange membrane fuel cells (PEMFC), are among the most critical degradation mechanisms limiting the commercial lifetime of these systems. In this study, to provide a solution to these structural instability problems, vulcan-supported sub-micron sized Pt₃Co alloy catalysts with a core-shell morphology were synthesized via a microwave-assisted method. As a result of the characterization analyses, it was determined that the average Cobalt (Co) core diameter of the catalysts was 32.27 nm, the protective Platinum (Pt) shell thickness surrounding the core was 19.17 nm, and the total particle size reached the order of approximately 70 nm. This specific sub-micron architecture is anticipated to act as a strong structural barrier against Ostwald ripening and agglomeration, which are chronic problems of ultra-small (<5 nm) particles. For the membrane electrode assembly (MEA) optimization processes, the cathode platinum loading was designed at a level of 0.60 mg Pt/cm², aiming to prevent mass transport resistances. SEM analyses of the synthesized Pt₃Co bimetallic catalyst system morphologically confirmed that the Co@Pt core-shell nanoparticles were highly densely and efficiently distributed on the porous structure of the Vulcan XC-72 carbon support. The active centers with high surface area and the porous architecture observed in the micrographs are of a nature to facilitate mass transfer during electrochemical reactions. Consequently, thanks to the metal-support interaction of the carbon support and the developed thick platinum armor, this optimized morphology is evaluated to constitute a promising cathode electrode template in terms of offering high corrosion resistance and thermodynamic stability in long-term fuel cell operations.

Keywords: PEM Fuel Cell, Core-Shell Catalyst, Pt₃Co, Vulcan, Microwave Synthesis, Platinum Loading Strategy.

1. INTRODUCTION

The global climate crisis and the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere due to fossil fuel consumption have mandated a transition towards sustainable and zero-carbon targeted clean energy technologies (Calvin et al., 2023). In this regard, hydrogen energy, offering high energy density and zero emission potential, is considered one of the most strategic alternatives that will shape the future energy ecosystem (Turner, 2004). For the highly efficient, direct conversion of hydrogen into electrical energy, Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) stand out with a wide range of commercial applications from portable electronics to the automotive sector, thanks to their low operating temperatures, fast startup times, and high power densities (Barbir, 2005; Wang et al., 2020). However, the sluggish kinetics of the oxygen reduction reaction (ORR) occurring at the cathode layer of membrane electrode assemblies, which form the heart of PEMFC systems, the high cost of the platinum (Pt)-based catalysts utilized, and stability issues in the harsh acidic environment constitute the greatest barriers to the full commercialization of this technology (Gasteiger et al., 2005; Zhang, 2008). This thesis study encompasses the development of vulcan-supported, sub-micron sized Pt₃Co alloy catalysts with a core-shell morphology through a microwave-assisted synthesis method in order to overcome the aforementioned limitations. The morphological and structural data obtained throughout the study aim to provide an original contribution to the commercialization process of fuel cell technologies by thoroughly examining the roles of the designed thick platinum armor structure and the selected 0.60 mg Pt/cm² loading strategy in catalyst stability and electrochemical performance optimization in light of the literature.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Chemicals Used : Chloroplatinic acid hexahydrate (H₂PtCl₆.6H₂O) and cobalt (II) chloride hexahydrate (CoCl₂.6H₂O) were used as the metal precursors in this study. Commercial Vulcan XC-72 carbon black was preferred as the carbon support material. Ethylene glycol (EG) was utilized as both the solvent and the reducing agent, while pH adjustments were carried out using a sodium hydroxide (NaOH) solution prepared in ethylene glycol.

2.2. Stepwise Microwave Synthesis: Pt₃Co/Vulcan electrocatalysts with a core-shell morphology were synthesized via a two-step microwave-assisted modified polyol method.

- **Step 1 (Cobalt Core Synthesis):** The Vulcan XC-72 support material was homogeneously dispersed in ethylene glycol using ultrasonic and magnetic stirrers. The cobalt salt was added to the suspension in a targeted stoichiometric ratio, and the medium pH was adjusted to an alkaline level. The mixture was reacted in a microwave reactor at a controlled temperature and duration to achieve the formation of cobalt cores on the carbon support.
- **Step 2 (Platinum Shell Formation):** A platinum precursor solution, prepared in a separate vessel and pH-adjusted, was added to the cobalt core suspension that had been cooled to room temperature. The final mixture was subjected to a second thermal treatment in the microwave reactor to reduce the platinum ions and ensure the formation of a protective shell layer over the cobalt cores.

2.3. Purification and Drying Processes: To remove reaction by-products and excess solvent, the synthesized bimetallic nanoparticles were washed with deionized water and isopropyl alcohol (IPA) through sequential centrifugation cycles. The resulting catalyst cake was dried in a vacuum oven at a low temperature for an extended period to maintain its structural stability.

2.4. Physical and Structural Characterization: The crystalline structure, phase formations, and alloying states of the catalysts were investigated by X-Ray Diffraction (XRD). The core-shell morphology, crystal planes, and particle size distribution of the synthesized nanoparticles were analyzed using Transmission Electron Microscopy (TEM) and Selected Area Electron Diffraction (SAED) techniques.

The surface morphology, topographic properties, and total metal composition of the catalysts were determined via Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS).

3. RESULTS AND DISCUSSION

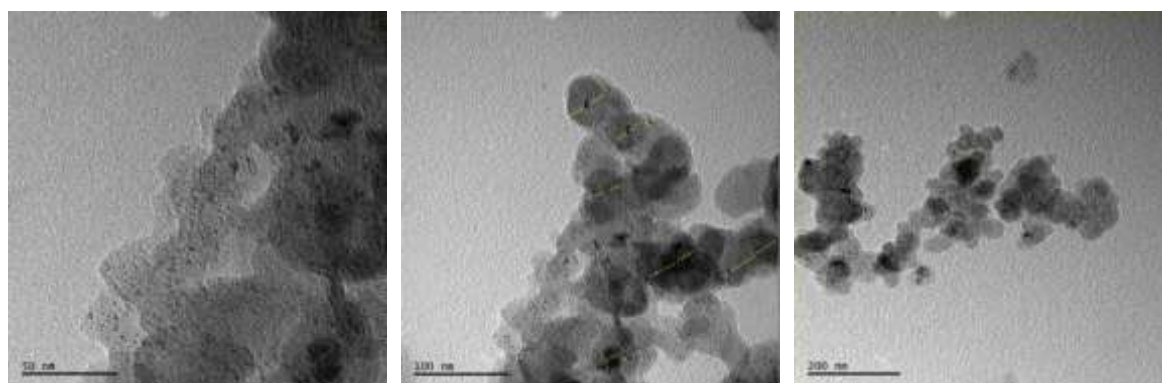


Figure 3.1. TEM micrographs of the synthesized Pt₃Co core-shell nanoparticles at different magnifications; ImageJ size analysis images scaled at (a) 50 nm, (b) 100 nm, and (c) 200 nm.

The morphological structures, surface properties, and microstructural appearances of the synthesized Co@Pt core-shell nanoparticles were investigated via TEM micrographs with different magnification windows provided in Figure 3.1. In the high-resolution Figure 4.1 (a) 50 nm and Figure 3.1 (b) 100 nm images, it can be observed that the particles are distributed in a generally spherical and near-homogeneous geometry, along with the linear size measurement lines performed using ImageJ software. In the Figure 3.1 (c) 200 nm micrograph scanning a wider area, the general distribution characteristics and local agglomeration behaviors of the nanoparticles on the matrix are observed.

Table 3.1. Statistical Size and Shell Thickness Analysis Data of the Synthesized 3:1 Ratio Target Co@Pt Core-Shell Nanoparticles

Analyzed Region / Parameter	Number of Samples (N)	Mean Size (nm)	Standard Deviation (nm)	Minimum Value (nm)	Maximum Value (nm)
Co Core Diameter	21	32,27	14,05	3,73	54,43
Pt Shell Thickness	21	19,17	7,55	6,58	33,04

In the TEM-based statistical size analyses of the synthesized vulcan-supported Co@Pt core-shell catalyst system, the average Co core diameter was determined as 32.27 ± 14.05 nm, and the protective Pt shell thickness was determined as 19.17 ± 7.55 nm. Although a polydisperse character was observed in particle sizes due to the sudden nucleation dynamics brought by microwave synthesis, the high surface area vulcan support successfully limited uncontrolled growth. The obtained morphological data confirm that a measurable and stable platinum shell phase was successfully built around the Co core, in accordance with the targeted Pt₃Co stoichiometry.

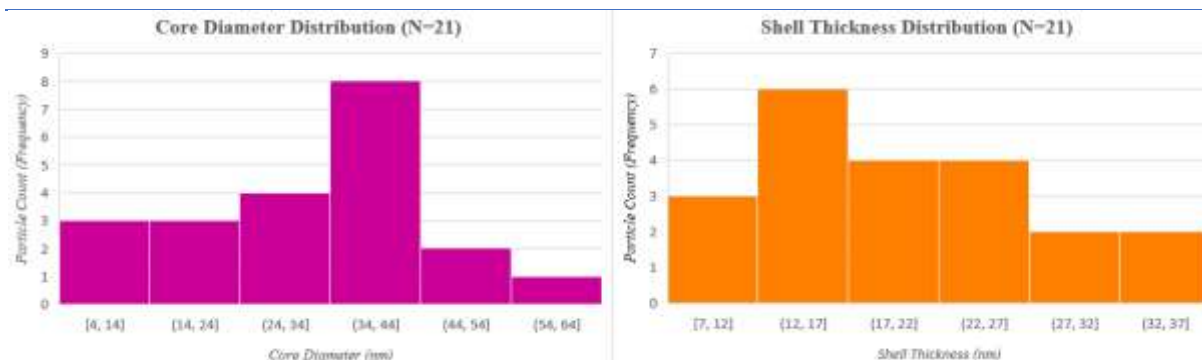


Figure 3.2. Histogram graphs of (a) Co Core Diameter Distribution and (b) Pt Shell Thickness Distribution for the Pt₃Co atomic ratio targeted, vulcan-supported core-shell (Co@Pt/Vulcan) nanoparticles (N=21).

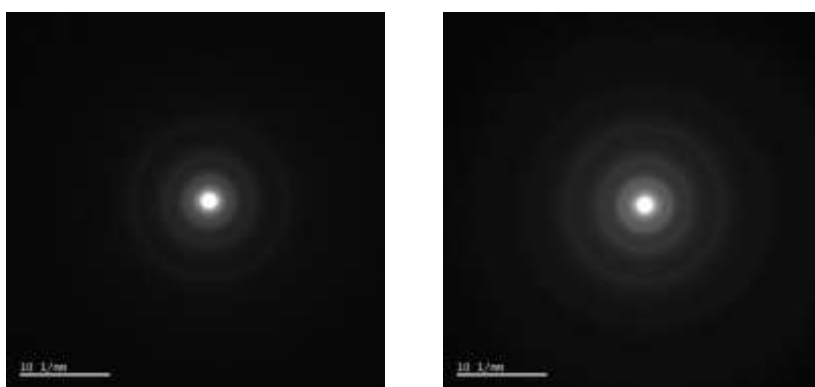
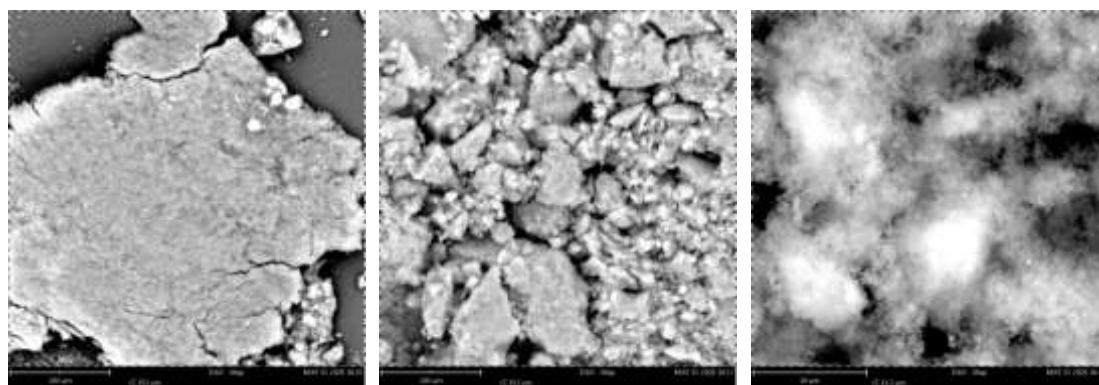


Figure 3.3. Selected Area Electron Diffraction (SAED) patterns of the Pt₃Co atomic ratio targeted, vulcan-supported core-shell (Co@Pt/Vulcan) nanoparticle system; (a) left region and (b) right region



SAED and TEM analyses confirmed that the synthesized Pt₃Co nanoparticles exhibit a highly homogeneous, polycrystalline Face-Centered Cubic (FCC) lattice structure. Prepared via rapid microwave synthesis, the catalyst features a unique core-shell architecture consisting of a ~70 nm sub-micron alloy core protected by a 19.17 nm thick platinum armor, which provides a strong structural barrier against Ostwald ripening and platinum dissolution in acidic media. To precisely characterize the reaction within the pure kinetically controlled Tafel region, the cathode platinum loading was optimized at 0.60 mg Pt/cm², yielding a high platinum utilization efficiency of 80–90%. Complementing these crystallographic findings, SEM micrographs revealed the surface topography and distribution characteristics of the Co@Pt/Vulcan catalyst.

Low-and-medium magnification images displayed the characteristic porous and fractured agglomerate morphology of the Vulcan XC-72 carbon black matrix, providing high surface area active sites to facilitate mass transport during electrochemical reactions. Finally, high-magnification SEM analysis confirmed that the core-shell nanoparticles are efficiently dispersed across the spongy nano-

spherical carbon network with minimal agglomeration, structurally and morphologically validating the successful synthesis of a stable, corrosion-resistant cathode template for long-term operations.

3. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Within the scope of this thesis study, as a solution to the corrosion and platinum sintering problems in PEM fuel cells, Vulcan-supported, sub-micron sized (~70 nm) core-shell Pt₃Co catalysts were successfully produced via the microwave method. Characterization findings showed that a strong structural barrier against Ostwald ripening and high cobalt leaching resistance were achieved with an average cobalt core diameter of 32.27 nm and a platinum shell thickness of 19.17 nm. It is evaluated that the loading amount of 0.60 mg Pt₃Co to be applied for the catalyst selected for the cathode layer and undergoing fuel cell testing will provide a stable electrochemical reference baseline by masking manufacturing uncertainties.

In future studies, it is planned to carry out production of thinner but continuous shell layers that will optimize the balance between the initial electrochemical active surface area (ECSA) and shell thickness, alongside gradual platinum loading reduction studies towards 0.40 - 0.20 mg Pt/cm² levels for commercial automotive targets. To optimize the d-band center of the system and increase corrosion resistance, nickel (Ni) or iron (Fe) doped ternary sub-micron core-shell combinations will be tested. Finally, in order to further strengthen the metal-support interaction by increasing electrical conductivity and functional group diversity, it is aimed to perform the synthesis using reduced graphene oxide (rGO) support in the subsequent stages.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by TÜBİTAK under Grant No. 122N064. The experimental work reported in this study was carried out at the TÜBİTAK MAM Hydrogen and Fuel Cell Technologies Research Group Laboratories, whose support is gratefully acknowledged.

RHIZOCTONIA ROOT AND CROWN ROT OF SUGAR BEET IN SİVAS

Doç. Dr. Hale GÜNAÇTI

Sivas Science and Technology University, Faculty of Agriculture Science and Technology,
Department of Plant Pathology, Sivas-Türkiye

Email: hale.gunacti@sivas.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5587-1845>

Özet

Şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.), dünya şeker üretiminin yaklaşık %20–30'unu karşılayan en önemli endüstri bitkilerinden biridir. Sivas ilinde fungal hastalıklar, şeker pancarı üretimini sınırlandıran başlıca biyotik etmenler arasında yer almakta olup, özellikle *Cercospora* yaprak lekesi, *Rhizomania* (kök sakallanması) ile *Rhizoctonia* kaynaklı kök ve taç çürüklüğü önemli verim ve kalite kayıplarına neden olmaktadır. Bu hastalıklar arasında *Rhizoctonia solani* Kühn, geniş konukçu dizisi, toprakta uzun süre canlı kalabilmesi ve uygun çevre koşullarında şiddetli kök ve taç çürüklüğüne neden olması nedeniyle giderek daha önemli bir patojen haline gelmiştir. Hastalığın şiddetine ve çevresel koşullara bağlı olarak verim kayıpları %30–60 düzeyine ulaşabilmekte, salgın koşullarında ise ürün kayıpları tamamen ürünün kaybedilmesine kadar varabilmektedir. Patojenin miselyum ve sklerot formunda toprakta uzun süre canlılığını sürdürebilmesi ve farklı çevresel koşullara yüksek uyum yeteneği göstermesi, hastalık yönetimini güçleştirmektedir. Bu nedenle sürdürülebilir hastalık yönetimi; münavebe, dayanıklı çeşitlerin kullanımı, sertifikalı tohumluk, uygun kültürel uygulamalar, biyolojik mücadele etmenleri ve fungusitlerin bilinçli kullanımını bir araya getiren entegre bir yaklaşımı gerektirmektedir. Bu derlemede, *R. solani*'nin biyolojisi, epidemiyolojisi, hastalık belirtileri ve entegre mücadele stratejilerine ilişkin güncel bilgiler, özellikle Sivas ekolojik koşullarındaki önemi dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Beta vulgaris*, *Rhizoctonia solani*, kök çürüklüğü, taç çürüklüğü, entegre hastalık yönetimi

RHIZOCTONIA ROOT AND CROWN ROT OF SUGAR BEET IN SİVAS

Abstract

Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) is one of the world's most important industrial crops, supplying approximately 20–30% of global sugar production. In Sivas Province, fungal diseases are among the major biotic constraints limiting sugar beet productivity, with *Cercospora* leaf spot, Rhizomania, and *Rhizoctonia* root and crown rot causing significant yield and quality losses. Among these diseases, *Rhizoctonia solani* Kühn has become increasingly important because of its wide host range, long-term survival in soil, and ability to cause severe root and crown rot under favorable environmental conditions. Depending on disease severity and environmental conditions, yield losses may reach 30–60% and, under epidemic conditions, may approach complete crop failure. The persistence of the pathogen as mycelia and sclerotia, together with its broad ecological adaptability, makes disease management particularly challenging. Sustainable management therefore requires an integrated approach combining crop rotation, resistant cultivars, certified seed, appropriate cultural practices, biological control agents, and judicious fungicide applications. This review summarizes the current knowledge on the biology, epidemiology, symptomatology, and integrated management strategies of *R. solani*, with particular emphasis on its importance for sustainable sugar beet production under the ecological conditions of Sivas.

Keywords: *Beta vulgaris*, *Rhizoctonia solani*, root rot, crown rot, integrated disease management

1.Giriş

Şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.), *Amaranthaceae* familyasına ait iki yıllık önemli bir endüstri bitkisi olup, dünya şeker üretiminin yaklaşık %20–30'unu karşılamaktadır. Şeker kamışından sonra en önemli şeker kaynağı olan bu bitki, yalnızca şeker sanayisinin değil aynı zamanda hayvancılık, fermantasyon ve biyobazlı endüstriler için önemli bir hammadde niteliğindedir. Türkiye, dünya şeker pancarı üretiminde önde gelen ülkeler arasında yer almakta olup, üretim özellikle İç ve Doğu Anadolu Bölgelerinde yoğunlaşmaktadır.

Sivas ili, karasal iklimi, yüksek rakımı ve sulanabilir tarım alanları sayesinde Türkiye'nin önemli şeker pancarı üretim merkezlerinden biridir. İlde şeker pancarı üretimi yalnızca şeker sanayisine hammadde sağlamamakta; küspe ve melas gibi yan ürünleriyle hayvancılık ve gıda sanayisine de önemli katkılar sunmaktadır (Şiray, 1990; Anonim, 2007). Türkiye'de 2024 yılında yaklaşık 23 milyon ton şeker pancarı üretilmiş olup, Sivas'ta üretim Akıncılar, Altınyayla, Gemerek, Kangal, Merkez, Suşehri, Şarkışla, Ulaş ve Yıldızeli ilçelerinde yoğunlaşmaktadır (TÜİK, 2025). Bölgenin agroekolojik özellikleri nedeniyle üretim sürecinde sulama yönetimi, hasat zamanı ve uygun yetiştirme teknikleri verim ve kaliteyi belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır.

Şeker pancarı üretiminde verim ve kaliteyi sınırlandıran en önemli biyotik etmenler yabancı otlar, hastalıklar ve zararlılardır. Bitki koruma etmenlerine bağlı toplam ürün kayıplarının %45,2'ye kadar ulaşabildiği; bu kayıpların %16,5'inin hastalıklardan, %16,5'inin zararlılardan ve %12,2'sinin yabancı otlardan kaynaklandığı bildirilmektedir (Yiğit, 2001, Savary,2019). Sivas koşullarında ise fungal hastalıklar üretimi tehdit eden en önemli biyotik faktörler arasında yer almakta olup, *Rhizoctonia solani* kaynaklı kök ve taç çürüklüğü hastalıkları önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır.

Rhizoctonia solani Kühn, geniş konukçu dizisi, toprakta miselyum ve sklerot formunda uzun yıllar canlı kalabilmesi ve farklı çevresel koşullara kolay uyum sağlayabilmesi nedeniyle dünya genelinde şeker pancarında görülen en önemli toprak kökenli fungal patojenlerden biri olarak kabul edilmektedir (Holmquist ve ark., 2021). Patojen, özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek toprak nemi koşullarında hızla gelişmekte; kök ve taç çürüklüğüne neden olarak önemli verim ve kalite kayıpları oluşturmaktadır. Ayrıca iklim değişikliğine bağlı sıcaklık artışları, düzensiz yağış rejimleri ve yoğun sulama uygulamalarının hastalığın yaygınlığını ve şiddetini artırabileceği bildirilmektedir.

Rhizoctonia solani'nin neden olduğu enfeksiyonlar yalnızca kök verimini azaltmakla kalmamakta; sakkaroz birikimini ve şeker ekstraksiyon verimini de düşürerek depolama ve işleme süreçlerinde önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Patojenin uzun süre toprakta canlılığını sürdürebilmesi ve mücadelede karşılaşılan güçlükler nedeniyle hastalık yönetiminde kültürel önlemler, dayanıklı çeşit kullanımı, biyolojik mücadele ve kimyasal uygulamaların birlikte değerlendirildiği entegre mücadele stratejileri ön plana çıkmaktadır.

2.Rhizoctonia solani'nin Taksonomik Konumu ve Biyolojik Özellikleri

Rhizoctonia solani, Fungi âleminde Basidiomycota bölümüne bağlı Ceratobasidiaceae familyasında yer alan, ekonomik açıdan önemli bir toprak kökenli fungustur. Fungusun teleomorf formu *Thanatephorus cucumeris* olarak bilinmektedir. İlk kez 1858 yılında Julius Kühn tarafından tanımlanan bu patojen, günümüzde dünyanın hemen her bölgesinde yaygın olarak bulunmakta ve geniş konukçu dizisi nedeniyle birçok kültür bitkisinde önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Uzun yıllar morfolojik özelliklerine göre sınıflandırılan tür, günümüzde moleküler filogenetik yöntemlerin gelişmesiyle daha ayrıntılı olarak karakterize edilmektedir.

Rhizoctonia solani, farklı patojenite özelliklerine sahip çok sayıda anastomoz grubundan (Anastomosis Group, AG) oluşan kompleks bir tür grubudur. Anastomoz grupları, hiflerin birbirleriyle kaynaşabilme (anastomoz) yeteneklerine göre belirlenmektedir. Günümüzde AG-1'den AG-13'e kadar farklı gruplar tanımlanmış olup, şeker pancarında en önemli patojenik gruplar AG-2-2 IIIB, AG-2-2 IV ve AG-4'tür. Bunlar arasında özellikle AG-2-2 IIIB, dünya genelinde şeker pancarında kök ve taç çürüklüğünün başlıca etmeni olarak kabul edilmekte ve Avrupa ile Kuzey Amerika'daki üretim alanlarında ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Yapılan genomik ve moleküler çalışmalar, AG-2-2 IIIB grubunun karbonhidrat aktif enzimler (Carbohydrate-Active enZymes; CAZymes) bakımından oldukça zengin olduğunu ve bu sayede bitki hücre duvarını etkin biçimde parçalayarak kök dokularında hızlı kolonizasyon gerçekleştirebildiğini ortaya koymuştur. Bu özellik, söz konusu grubun yüksek virülensini ve şeker pancarında oluşturduğu agresif hastalık gelişimini açıklayan temel mekanizmalardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Fungus doğada çoğunlukla eşeysiz dönemiyle bulunmakta ve yaşam döngüsünü miselyum ile sklerot yapıları aracılığıyla sürdürmektedir. Genç hifler renksiz ve ince yapılı iken, yaşlanmayla birlikte melanin birikimine bağlı olarak kahverengileşmektedir. Mikroskopik tanıda karakteristik 90° açıyla dallanma ve dallanma noktasındaki daralma önemli ayırt edici özellikler arasında yer almaktadır.

Rhizoctonia solani, olumsuz çevre koşullarına dayanıklı sklerotları sayesinde toprakta uzun yıllar canlılığını koruyabilmekte ve uygun sıcaklık ile nem koşulları oluştuğunda yeniden enfeksiyon başlatabilmektedir. Bu yüksek yaşam gücü, geniş konukçu dizisi ve çevresel koşullara kolay uyum sağlayabilme yeteneği, patojenin tarım alanlarında kalıcı bir inokulum kaynağı oluşturmaya neden olmakta ve hastalığın yönetimini güçleştiren en önemli biyolojik özellikleri arasında yer almaktadır.

3.Epidemiyoloji ve Yayılışı

Rhizoctonia solani, 200'den fazla bitki türünde hastalık oluşturabilen, geniş konukçu dizisine sahiptir. Şeker pancarında hastalığın ortaya çıkışı ve şiddeti; patojen yoğunluğu, konukçunun duyarlılığı, toprak özellikleri ve çevresel faktörler arasındaki karmaşık etkileşimler sonucunda şekillenmektedir.

Hastalığın gelişimini belirleyen en önemli çevresel faktörler toprak sıcaklığı ve nemidir. Araştırmalar, *R. solani*'nin özellikle 22–35 °C sıcaklık aralığında ve yüksek toprak nemi koşullarında optimum gelişim gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle sulama yapılan alanlarda, drenaj problemi bulunan ağır bünyeli topraklarda ve uzun süre yüksek nemin korunduğu üretim alanlarında hastalık daha yaygın ve şiddetli görülmektedir. Toprak sıcaklığındaki artış, patojenin miselyal gelişimini hızlandırarak enfeksiyon sürecini teşvik etmektedir.

Patojenin başlıca inokulum kaynaklarını sklerotlar, enfekteli bitki artıkları ve dormant miselyum oluşturmaktadır. Kalın duvarlı sklerotlar sayesinde *R. solani* toprakta uzun yıllar canlılığını koruyabilmekte ve uygun çevresel koşullar oluştuğunda yeniden enfeksiyon başlatabilmektedir. Bu özellik, özellikle münavebenin uygulanmadığı üretim alanlarında hastalığın sürekli bir sorun haline gelmesine neden olmaktadır.

Hastalığın yayılmasında tarımsal uygulamalar önemli rol oynamaktadır. Bulaşık toprak parçalarının tarım makineleriyle taşınması, enfekteli bitki artıklarının tarlada bırakılması ile sulama ve drenaj sularının hareketi patojenin yeni üretim alanlarına yayılmasını kolaylaştırmaktadır. Özellikle tarla ekipmanlarının yeterli şekilde temizlenmemesi ve dezenfekte edilmemesi bölgesel yayılımı artıran önemli faktörlerden biridir.

Son yıllarda hastalığın epidemiyolojisinin daha doğru öngörülebilmesi amacıyla toprak sıcaklığı, toprak nemi ve çevresel koşulları esas alan hastalık tahmin modelleri geliştirilmektedir. Bu modeller, patojenin enfeksiyon için uygun koşulların oluştuğu dönemleri önceden belirleyerek fungisit uygulamalarının zamanlamasını optimize etmeyi ve gereksiz ilaçlamaları azaltmayı amaçlamaktadır. Özellikle toprak sıcaklığının 15–18 °C'nin üzerine çıkmasıyla birlikte enfeksiyon riskinin artmaya başladığı, 22–30 °C aralığında ise yüksek toprak nemiyle birlikte hastalık gelişiminin hızlandığı bildirilmektedir. Bu nedenle düzenli tarla kontrolleri, inokulum yoğunluğunun izlenmesi ve meteorolojik verilerle desteklenen karar destek sistemlerinin kullanımı, *Rhizoctonia* kök ve taç çürüklüğünün sürdürülebilir yönetiminde giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Epidemiyolojik çalışmalar, iklim değişikliğinin *Rhizoctonia* kök ve taç çürüklüğü üzerindeki etkisinin giderek arttığını göstermektedir. Artan sıcaklıklar, düzensiz yağış rejimleri ve sulama ihtiyacındaki artışın hastalığın daha erken başlamasına, daha uzun süre devam etmesine ve daha geniş alanlara yayılmasına neden olabileceği bildirilmektedir. Bu nedenle *R. solani*, iklim değişikliğinden etkilenmesi beklenen önemli toprak kökenli bitki patojenleri arasında değerlendirilmektedir. Sivas ili, karasal iklim koşulları nedeniyle üretim sezonunun başlangıcında hastalığın gelişimini sınırlayabilecek düşük toprak sıcaklıklarına sahip olmakla birlikte, yaz döneminde artan sıcaklıklar ve sulama uygulamaları *Rhizoctonia* kök ve taç çürüklüğü açısından uygun çevresel koşullar oluşturabilmektedir. Özellikle sulama yapılan, ağır tekstürlü ve drenajı zayıf topraklarda hastalık riski daha yüksektir. Her ne kadar Sivas'ta hastalığın yaygınlığına ilişkin kapsamlı epidemiyolojik veriler sınırlı olsa da, bölgenin yaz döneminde artan sıcaklıkları ve sulamaya dayalı üretim sistemi hastalığın gelişimi için uygun koşullar oluşturabilmektedir. İklim değişikliğinin etkisiyle sıcaklık artışlarının devam etmesi halinde *Rhizoctonia* kök ve taç çürüklüğünün gelecekte bölge açısından daha önemli bir risk faktörü haline gelmesi beklenmektedir.

4. Hastalık Belirtileri

Rhizoctonia solani'nin neden olduğu belirtiler, bitkinin gelişme dönemine ve enfeksiyonun şiddetine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Hastalık, fide döneminde çökerten (damping-off), gelişmiş bitkilerde ise kök ve taç çürüklüğü şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Fide döneminde enfeksiyon genellikle toprak yüzeyine yakın hipokotil bölgesinde başlamaktadır. Enfekteli dokular başlangıçta suya batırılmış görünüm almakta, kısa süre içerisinde kahverengi nekrotik lezyonlar gelişmektedir. Lezyonların hızla genişlemesi sonucunda iletim dokuları zarar görmekte, fideler gelişimini sürdüremeyerek solmakta ve çoğunlukla ölmektedir. Çıkış öncesi ve çıkış sonrası meydana gelen bu kayıplar bitki sıklığını azaltmakta, tarlada düzensiz çıkışlara ve boşlukların oluşmasına neden olmaktadır.

Gelişmiş bitkilerde enfeksiyon çoğunlukla taç bölgesinde veya toprak yüzeyinin hemen altında başlamaktadır. İlk belirtiler küçük, koyu kahverengi ve hafif çökük nekrotik lezyonlar şeklinde görülmekte, hastalık ilerledikçe bu lezyonlar birleşerek kökün büyük bölümünü kaplayan geniş çürüklük alanlarına dönüşmektedir. İleri dönemlerde kök dokusunda derin çatlaklar, deformasyonlar ve kanser benzeri yaralar oluşmakta; sağlıklı ve hastalıklı dokular arasında belirgin bir sınır meydana gelmesi hastalığın karakteristik belirtilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Enfekte dokuların sekonder bakteri ve saprofit funguslar tarafından kolonize edilmesiyle yumuşak çürüklük gelişebilmekte ve doku yıkımı hızlanmaktadır.

Kök sisteminde meydana gelen enfeksiyonlar bitkinin toprak üstü organlarında da belirgin fizyolojik bozukluklara yol açmaktadır. İlk olarak yaşlı yapraklarda solgunluk ve pörsüme görülmekte, bunu sararma, nekroz ve erken yaprak kuruması izlemektedir. Hastalık ilerledikçe yapraklar toprak yüzeyine doğru yatmakta ve tamamen kurumaktadır. Kuruyan yaprak saplarının taç bölgesine bağlı kalması sonucu oluşan siyah rozet görünümü, *Rhizoctonia* kök ve taç çürüklüğünün ayırt edici belirtilerinden biridir.

Hastalık yalnızca kök verimini azaltmakla kalmamakta; sakkaroz birikimini, polarizasyon değerini ve ekstrakte edilebilir şeker miktarını da önemli ölçüde düşürmektedir. Bunun yanında enfekteli kökler depolama sürecinde sekonder mikroorganizmaların gelişimine daha duyarlı hale gelmekte, depolama kayıpları artmakta ve şeker fabrikalarında işleme verimi olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle *R. solani*, şeker pancarında hem tarla döneminde hem de hasat sonrası süreçte önemli ekonomik kayıplara neden olan başlıca toprak kökenli patojenlerden biri olarak kabul edilmektedir.

5. Hastalıkla Mücadele Stratejileri

Rhizoctonia solani'nin geniş konukçu dizisine sahip olması, toprakta uzun yıllar canlılığını sürdürebilmesi ve farklı çevresel koşullara yüksek adaptasyon gösterebilmesi nedeniyle hastalığın etkin kontrolü oldukça güçtür. Günümüzde başarılı hastalık yönetimi; kültürel uygulamalar, dayanıklı çeşit kullanımı, biyolojik mücadele, kimyasal mücadele ve uygun tarımsal yönetim uygulamalarının birlikte değerlendirildiği entegre hastalık yönetimi yaklaşımına dayanmaktadır.

5.1. Kültürel Mücadele

Kültürel önlemler, hastalığın yönetiminde ilk ve en önemli basamağı oluşturmaktadır. Temel amaç, topraktaki inokulum yoğunluğunu azaltarak enfeksiyon riskini en düşük düzeye indirmektir. Bu doğrultuda en etkili uygulamalardan biri münavebedir. Şeker pancarının aynı tarlada ardışık yıllarda yetiştirilmesi patojen yoğunluğunu artırdığından, en az 3–5 yıllık ekim nöbeti önerilmektedir. Özellikle buğday ve arpa gibi AG-2-2 IIIB grubunun uygun konukçusu olmayan tahıllarla yapılan rotasyonların inokulum yoğunluğunu önemli ölçüde azalttığı bildirilmektedir.

Toprak drenajının iyileştirilmesi, hastalık yönetiminin diğer önemli bileşenidir. Ağır bünyeli ve drenajı zayıf topraklarda suyun uzun süre göllenmesi enfeksiyon riskini artırmaktadır. Bu nedenle yüzey ve taban drenajının sağlanması, toprak sıkışmasının azaltılması, kontrollü tarla trafiğinin uygulanması ve uygun sulama yönetimi kök gelişimini destekleyerek bitkinin enfeksiyona karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Ayrıca organik madde uygulamaları, sertifikalı tohum kullanımı, enfekteli bitki artıklarının tarladan uzaklaştırılması ve dengeli gübreleme önerilen diğer kültürel uygulamalar arasında yer almaktadır.

5.2. Dayanıklı Çeşitlerin Kullanımı

Dayanıklı çeşitlerin kullanımı, sürdürülebilir hastalık yönetiminin en ekonomik ve çevre dostu bileşenlerinden biridir. Ancak *R. solani*'nin yüksek genetik çeşitliliğe sahip olması ve farklı anastomoz gruplarının bulunması nedeniyle tam dayanıklılık sağlayan çeşitlerin geliştirilmesi oldukça güçtür. Buna

karşın orta düzeyde dayanıklılık gösteren çeşitlerin kullanımı, diğer mücadele yöntemleriyle birlikte uygulandığında hastalık şiddetini ve verim kayıplarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Günümüzde moleküler markörler, genomik seleksiyon ve dayanıklılıkla ilişkili gen bölgelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar, yeni çeşit geliştirme programlarına önemli katkılar sağlamaktadır.

5.3. Kimyasal Mücadele

Kimyasal mücadele, hastalık riskinin yüksek olduğu üretim alanlarında entegre mücadele programlarının önemli bileşenlerinden biridir. Şeker pancarında *Rhizoctonia* kök ve taç çürüklüğüne karşı azoxystrobin, flutolanil, pencycuron, prothioconazole, pyraclostrobin, trifloxystrobin ve tebuconazole gibi aktif maddeler kullanılmaktadır. Özellikle strobilurin grubu fungusitlerin erken dönemde uygulanması hastalık şiddetini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Azoxystrobin hem fide döneminde hem de gelişmiş bitkilerde koruyucu etki gösterirken, flutolanil özellikle AG-2-2 kaynaklı enfeksiyonlara karşı yüksek etkinlik sağlamaktadır.

Bununla birlikte aynı etki mekanizmasına sahip fungusitlerin uzun süre ve yoğun şekilde kullanılması direnç gelişimine, toprak mikrobiyal dengesinin bozulmasına ve çevresel risklerin artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle farklı FRAC gruplarına ait fungusitlerin dönüşümlü kullanılması ve kimyasal mücadelenin diğer yönetim stratejileriyle birlikte uygulanması önerilmektedir.

5.4. Biyolojik Mücadele

Son yıllarda biyolojik mücadele, *Rhizoctonia solani*'nin sürdürülebilir yönetiminde umut vadeden yaklaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle *Bacillus subtilis*, *Bacillus velezensis* ve *Bacillus amyloliquefaciens* gibi bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR); antibiyotik üretimi, siderofor sentezi, besin rekabeti, lityk enzim üretimi ve bitkide indüklenmiş sistemik dayanıklılığı uyarmaları sayesinde patojen gelişimini baskılayabilmektedir. Yapılan çalışmalar, bu bakterilerin şeker pancarında kök ve taç çürüklüğü şiddetini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Fungal biyolojik mücadele etmenleri arasında ise *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma virens* ve *Gliocladium* spp. önemli yer tutmaktadır. Bu mikroorganizmalar mikoparazitizm, antibiyotik üretimi, hücre duvarını parçalayan enzimlerin sentezi ve konukçu bitkide savunma mekanizmalarının aktivasyonu yoluyla patojen yoğunluğunu azaltmaktadır. Gelecekte biyolojik mücadele etmenlerinin tek başına veya düşük doz fungusitlerle kombine şekilde kullanılması, çevre dostu ve sürdürülebilir hastalık yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

6. Sonuç

Rhizoctonia solani, şeker pancarında kök ve taç çürüklüğüne neden olan, dünya genelinde ekonomik açıdan en önemli toprak kökenli fungal patojenlerden biridir. Geniş konukçu dizisi, toprakta uzun yıllar canlılığını sürdürebilmesi, farklı çevresel koşullara yüksek adaptasyon yeteneği göstermesi ve iklim değişikliğinin oluşturduğu uygun çevresel koşullar nedeniyle hastalığın gelecekte öneminin daha da artacağı öngörülmektedir.

Günümüzde hastalığın tamamen ortadan kaldırılmasını sağlayabilecek tek bir mücadele yöntemi bulunmamaktadır. Bu nedenle kültürel önlemler, dayanıklı çeşit kullanımı, biyolojik mücadele etmenleri, uygun fungusit programları ve çevresel verilerle desteklenen karar destek sistemlerinin birlikte uygulandığı entegre hastalık yönetimi stratejileri en etkili yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Ayrıca moleküler tanı yöntemleri, genomik temelli dayanıklılık çalışmaları, yapay zekâ destekli hastalık tahmin sistemleri ve hassas tarım teknolojilerindeki gelişmelerin, gelecekte *Rhizoctonia* kök ve taç çürüklüğünün daha etkin ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesine önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir. Bu nedenle araştırmaların, özellikle dayanıklı çeşit geliştirilmesi, biyolojik mücadele ajanlarının etkinliğinin artırılması ve iklim değişikliği koşullarına uyum sağlayabilecek entegre yönetim stratejilerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaştırılması büyük önem taşımaktadır.

Kaynaklar

- Ajayi-Oyetunde, O. O., & Bradley, C. A. (2018). *Rhizoctonia solani*: Taxonomy, population biology and management of Rhizoctonia seedling disease of soybean. *Molecular Plant Pathology*, 19, 3–17.
- Avan, M., & Katırcıoğlu, Y. Z. (2019). Şeker pancarlarında görülen *Rhizoctonia* türlerinin özellikleri, oluşturduğu hastalıklar ve korunma yolları. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16(1), 105–112.

- Dinç, G. & Gül, A. (2022). Estimation of effective spatial variables when visiting public squares through factor analysis model. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(3), p.25-36. 04022022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000844](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000844)
- Farhaoui, A., El Alami, N., Khadiri, M., Ezrari, S., Radouane, N., Baala, M., et al. (2023). Biological control of diseases caused by *Rhizoctonia solani* AG-2-2 in sugar beet using plant growth-promoting rhizobacteria. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 124, 101966.
- Harveson, R. M. (2008). *Rhizoctonia Crown and Root Rot of Sugar Beet*. University of Nebraska Extension.
- Holmquist, M., Panella, L., Hanson, L., & Strausbaugh, C. A. (2021). Integrated management of *Rhizoctonia* root rot in sugar beet. *Plant Disease*, 105, 2310–2322.
- Jacobsen, B. J. (2005). Root rot diseases of sugar beet. *Sugar Tech*, 7, 89–95.
- Jenkins, C. N. & Joppa, L. (2009). Expansion of the global terrestrial protected area system. *Biological Conservation*, 142: 2166–2174. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.04.016.
- Kiewnick, S., Jacobsen, B. J., Braun-Kiewnick, A., Eckhoff, J. L. A., & Bergman, J. W. (2001). Integrated control of *Rhizoctonia* crown and root rot of sugar beet. *Plant Disease*, 85, 718–722.
- Martellozzo, F., Amato, F., Murgante, B. & Clarke, K. C. (2018). Modeling the impact of urban growth on agriculture and natural land in Italy to 2030. *Applied Geography*, 91, 156-167.
- Misra, V., Mall, A. K., & Singh, D. (2023). *Rhizoctonia* root-rot diseases in sugar beet: Pathogen diversity, pathogenesis and cutting-edge advancements in management research. *The Microbe*, 1, 100011.
- Salman, Ö., & Boyraz, N. (2025). Isolation, identification and determination of biocontrol activities of rhizobacteria against crown rot disease agent *Rhizoctonia solani* AG 2-2 in sugar beet. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 28(5), 1241–1258.
- Sarı, A., & Boyraz, N. (2019). Konya ili Çumra yöresinde şeker pancarında görülen fungal hastalıklar üzerine genel bir değerlendirme. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi*, 8(2), 279–288.
- Strausbaugh, C. A., Eujayl, I. A., Panella, L. W., & Hanson, L. E. (2011). Evaluation of fungicides for management of *Rhizoctonia* root rot on sugar beet. *Plant Disease*, 95, 101–107.
- The Economist. (2004). The Rise of the Green Building, Accessed on 10 Dec 2017, available online at: http://economist.com/PrinterFriendly.cfm?Story_ID=3422965
- Tol, R. (2002). Estimates of the damage costs of climate change. *Environmental and Resource Economics*, 21(2), 135-160.
- TUIK (2015). Urban and Rural Population Data in Turkey. Access Address (12.12.2019): <http://tuik.gov.tr/>

CERCOSPORA LEAF SPOT DISEASE IN SUGAR BEET: A GLOBAL PERSPECTIVE

Doç. Dr. Hale GÜNAÇTI

Sivas Science and Technology University, Faculty of Agriculture Science and Technology,
Department of Plant Pathology, Sivas-Türkiye

Email: hale.gunacti@sivas.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5587-1845>

Özet

Cercospora yaprak lekesi hastalığı, *Cercospora beticola* Sacc. tarafından oluşturulan ve dünya genelinde şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.) üretimini sınırlandıran en önemli fungal hastalıklardan biridir. Hastalık, şeker pancarı yetiştirilen hemen hemen tüm ılıman ve yarı tropik bölgelerde yaygın olarak görülmekte; özellikle yüksek sıcaklık ve nem koşullarında hızla gelişerek önemli verim ve kalite kayıplarına neden olmaktadır. Enfeksiyona bağlı olarak yaprak alanının azalması fotosentez kapasitenin düşmesine neden olmaktadır. Azalan fotosentezi telafi etmek amacıyla bitki, kökte depoladığı karbonhidrat rezervlerini yeni yaprakların gelişimine yönlendirmekte; bunun sonucunda kök verimi, sakkaroz birikimi ve şeker ekstraksiyon verimi önemli ölçüde azalmaktadır. Son yıllarda birçok üretici ülkede fungusit direncinin yaygınlaşması, hastalığın yönetimini zorlaştıran en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Hastalık yönetiminde dayanıklı çeşitlerin kullanımı, uygun kültürel uygulamalar, hastalık tahmin ve erken uyarı sistemleri, fungusitlerin direnç yönetimi ilkeleri doğrultusunda kullanılması ve biyolojik mücadele yaklaşımlarının birlikte değerlendirilmesi sürdürülebilir üretim açısından büyük önem taşımaktadır. Bu derlemede *Cercospora beticola*'nın biyolojik özellikleri, epidemiyolojisi, hastalık belirtileri, ekonomik önemi ve güncel entegre mücadele stratejileri, dünya genelindeki son bilimsel gelişmeler ışığında kapsamlı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Beta vulgaris*, *Cercospora beticola*, Cercospora yaprak lekesi, epidemiyoloji, entegre hastalık yönetimi

CERCOSPORA LEAF SPOT DISEASE IN SUGAR BEET: A GLOBAL PERSPECTIVE

Abstract

Cercospora leaf spot, caused by *Cercospora beticola* Sacc., is one of the most destructive fungal diseases limiting sugar beet (*Beta vulgaris* L.) production worldwide. The disease occurs in nearly all temperate and subtropical sugar beet-growing regions and develops rapidly under warm and humid environmental conditions, resulting in substantial yield and quality losses. Disease-induced defoliation significantly reduces the photosynthetic capacity of the crop, while the allocation of stored carbohydrates to leaf regeneration decreases root yield, sucrose accumulation, and sugar extraction efficiency. In recent years, the widespread development of fungicide resistance has emerged as one of the major challenges in the sustainable management of the disease. Effective disease management requires an integrated approach combining resistant cultivars, appropriate cultural practices, disease forecasting and early warning systems, fungicide applications based on resistance management principles, and biological control strategies. This review comprehensively summarizes the current knowledge on the biology, epidemiology, symptomatology, economic importance, and integrated management of *Cercospora beticola*, highlighting recent advances and future perspectives for sustainable sugar beet production worldwide.

Keywords: *Beta vulgaris*, *Cercospora beticola*, Cercospora leaf spot, epidemiology, integrated disease management

1. Giriş

Şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.), Amaranthaceae familyasına ait iki yıllık önemli bir endüstri bitkisi olup, dünya kristal şeker üretiminin yaklaşık %20–25'ini karşılamaktadır. Şeker kamışından sonra en önemli şeker kaynağı olan bu bitki, yalnızca şeker üretiminde değil, aynı zamanda hayvancılık, biyoyakıt ve fermentasyon endüstrileri için de stratejik bir hammadde niteliğindedir. İşleme sonucunda elde edilen pancar posası hayvan beslemede, melas ise alkol, maya ve çeşitli biyoteknolojik ürünlerin üretiminde değerlendirilmektedir (Arioğlu, 2017).

Dünya şeker pancarı üretimi büyük ölçüde ılıman iklim kuşağında yoğunlaşmakta olup Rusya, Fransa, Almanya, Amerika Birleşik Devletleri ve Türkiye başlıca üretici ülkeler arasında yer almaktadır (FAO, 2024). Türkiye ise dünya şeker pancarı üretiminde önde gelen ülkelerden biri olup, üretim özellikle İç Anadolu Bölgesi'nde Konya, Kayseri, Eskişehir ve Aksaray illerinde yoğunlaşmaktadır (TÜİK, 2023). Şeker pancarı tarımı; ülke ekonomisine sağladığı katma değer, münavebe sistemindeki önemli rolü, kırsal kalkınmaya katkısı ve şeker sanayisinin temel hammaddesini oluşturması nedeniyle stratejik öneme sahiptir.

Şeker pancarı üretiminde verim ve kaliteyi sınırlandıran başlıca biyotik etmenler arasında fungal, bakteriyel ve viral hastalıklar yer almaktadır. Bunlar içerisinde *Cercospora beticola* Sacc.'nın neden olduğu *Cercospora* yaprak lekesi hastalığı, küresel ölçekte ekonomik açıdan en yıkıcı yaprak hastalığı olarak kabul edilmektedir. Bunun yanı sıra *Rhizoctonia solani* kaynaklı kök ve taç çürüklüğü, *Pythium* spp.'nin neden olduğu fide çökerten hastalığı ve Beet necrotic yellow vein virus (BNYVV)'ün etmeni olduğu Rhizomania da şeker pancarı yetiştiriciliğinde önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Hanson, 2019; McGrann ve ark., 2021).

Cercospora beticola, özellikle 25–30 °C sıcaklık ve yüksek bağıl nem koşullarında hızla gelişerek yapraklarda karakteristik nekrotik lezyonlar oluşturmakta ve fotosentetik yaprak alanının önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Fotosentez kapasitesindeki bu azalma sonucunda bitki, yeni yaprak oluşturabilmek amacıyla köklerde depoladığı karbonhidrat rezervlerini tüketmekte; bunun sonucunda kök verimi, sakkaroz birikimi ve şeker ekstraksiyon verimi önemli ölçüde düşmektedir (Wolf ve ark., 2021).

Uygun mücadele önlemlerinin uygulanmadığı koşullarda *Cercospora* yaprak lekesi hastalığı, şeker veriminde %40'a varan kayıplara neden olabilmektedir. Ayrıca hastalık, yalnızca verim kayıplarıyla sınırlı kalmayıp kökte safsızlık oluşturan bileşiklerin artmasına bağlı olarak şeker fabrikalarında teknolojik kayıpların da yükselmesine yol açmaktadır (Wolf ve ark., 2020). Türkiye'de özellikle Karadeniz, Marmara ve sulama yapılan İç Anadolu Bölgeleri, yaz aylarında görülen sıcak ve nemli iklim koşulları nedeniyle hastalığın epidemik gelişimi açısından yüksek risk taşımaktadır. Yapılan çalışmalar, hastalığın kök veriminde yaklaşık %25, polar şeker oranında ise %10–15 düzeyinde kayıplara neden olabildiğini göstermektedir (Özdemir ve ark., 2019).

Son yıllarda birçok üretici ülkede *Cercospora beticola* popülasyonlarında fungusitlere karşı yaygın direnç gelişiminin bildirilmesi, hastalık yönetimini daha karmaşık hale getirmiştir. Bu nedenle dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, kültürel önlemler, hastalık tahmin ve erken uyarı sistemleri, biyolojik mücadele uygulamaları ile direnç yönetimi ilkelerine uygun fungusit programlarının birlikte değerlendirildiği entegre hastalık yönetimi stratejileri sürdürülebilir şeker pancarı üretimi açısından büyük önem taşımaktadır (Skidmore ve ark., 2022).

2. *Cercospora beticola* ve Hastalık Oluşumu

2.1. Fungusun Genel Özellikleri

Cercospora beticola Sacc., şeker pancarında *Cercospora* yaprak lekesi hastalığının etmeni olup ilk kez 1876 yılında İtalyan mikolog Pier Andrea Saccardo tarafından tanımlanmıştır (Saccardo, 1876). Avrupa'da şeker pancarı endüstrisinin gelişmesiyle birlikte hastalığın ekonomik önemi daha iyi anlaşılmış ve 20. yüzyılın başlarından itibaren patojenin biyolojisi, epidemiyolojisi ve mücadele yöntemlerine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Draycott, 2016).

Cercospora beticola, Ascomycota şubesinde yer alan ve doğal koşullarda çoğunlukla anamorf (eşeysiz) dönemi gözlenen bir fungustur. Patojen, konidiyumlar aracılığıyla çoğalmakta ve enfeksiyon döngüsünü sürdürmektedir. Kışı enfekteli bitki artıkları, bulaşık tohumlar ve toprakta bulunan psödosklerotlar üzerinde geçirmekte; ilkbaharda uygun çevre koşullarının oluşmasıyla birlikte gelişen konidiyumlar rüzgâr, yağmur damlaları, sulama suyu ve tarımsal faaliyetler aracılığıyla sağlıklı bitkilere taşınmaktadır.

Patojenitenin temel mekanizmalarından biri, ışığa bağımlı bir fototoksin olan cercosporin üretimidir. Bu toksin, ışık varlığında reaktif oksijen türlerinin oluşumunu tetikleyerek hücre zarlarında oksidatif hasara neden olmakta, hücre nekrozunu hızlandırmakta ve hastalığa özgü karakteristik yaprak lekelerinin oluşumunda kritik rol oynamaktadır (Hanson, 2019).

Cercospora beticola'nın gelişimi için optimum sıcaklık 25–30 °C arasında olup, sıcaklığın 10 °C'nin altına düşmesiyle patojen gelişimi önemli ölçüde yavaşlamaktadır (Wolf ve ark., 2021). Enfeksiyonun gerçekleşebilmesi için yaprak yüzeyinde en az 10–12 saat süreyle serbest su tabakasının bulunması veya bağıl nemin %90–95'in üzerinde seyretmesi gerekmektedir. Bu nedenle uzun süreli çiğ oluşumu, yağışlar ve yağmurlama sulama hastalık gelişimini önemli ölçüde teşvik etmektedir. Hastalık, özellikle gece sıcaklıklarının 15 °C'nin üzerinde seyrettiği ve gündüz saatlerinde yüksek bağıl nemin hâkim olduğu ılıman iklim bölgelerinde daha şiddetli görülmektedir. Türkiye'de Karadeniz Bölgesi ile sulama yapılan İç Anadolu üretim alanları epidemik gelişim açısından en yüksek risk taşıyan bölgeler arasında yer almaktadır (Özdemir ve ark., 2019).

2.2. Hastalık Belirtileri

Cercospora beticola enfeksiyonları öncelikle yaşlı ve dış yapraklarda başlamaktadır. Hastalığın ilk belirtileri, yaprak ayasında çapı genellikle 2–5 mm arasında değişen, merkezi açık gri veya kül renginde, çevresi koyu kırmızımsı kahverengi ya da morumsu bir halka ile çevrili dairesel nekrotik lekeler şeklinde ortaya çıkmaktadır (Wolf ve ark., 2021). Hastalık ilerledikçe bu lekeler birleşerek geniş nekrotik alanlar oluşturmakta ve fotosentetik yaprak yüzeyinin büyük bölümünün kaybedilmesine neden olmaktadır. Şiddetli enfeksiyonlarda yaprak sapları da etkilenebilmekte, iletim dokularında meydana gelen zarar sonucunda yapraklar erken dönemde kuruyarak bitkiden ayrılmaktadır (Hanson, 2019).

Hastalık, bitkinin fizyolojik dengesini önemli ölçüde bozmakta ve yeni yaprak oluşumunu teşvik etmektedir. Bitki, kaybedilen yaprakların yerine yeni yaprak oluşturabilmek amacıyla kökte depoladığı sakkaroz rezervlerini kullanmakta; bunun sonucunda kök gelişimi, sakkaroz birikimi ve şeker verimi olumsuz etkilenmektedir. Sürekli yaprak yenilenmesi nedeniyle pancar başı bölgesinde uzama meydana gelmekte ve kök şekli bozulmaktadır (Arioğlu, 2017).

Yüksek nem koşullarında nekrotik lekelerin merkezinde oluşan koyu renkli konidioforlar ve bu yapılar üzerinde gelişen konidyumlar, hastalığın karakteristik mikroskopik belirtilerini oluşturmaktadır. Bu yapılar sekonder enfeksiyonların temel kaynağı olup, epideminin tarla içerisinde hızla yayılmasına katkı sağlamaktadır.

Cercospora yaprak lekesi doğrudan kök dokusunu enfekte etmemekle birlikte, fotosentez kapasitesindeki azalma nedeniyle kök ağırlığında, sakkaroz birikiminde ve şeker polarizasyonunda önemli düşüşlere neden olmaktadır. Ağır epidemilerde kök verimi ve şeker verimindeki kayıplar %40'a kadar ulaşabilmekte; ayrıca melas oluşturan safsızlık bileşiklerinin artması nedeniyle şeker ekstraksiyon verimi de önemli ölçüde azalmaktadır (Özdemir ve ark., 2019; Wolf ve ark., 2021).

2.3. Hastalık Döngüsü

Cercospora beticola'nın hastalık döngüsü, patojenin olumsuz çevre koşullarını enfekteli bitki artıkları, bulaşık tohumlar ve toprakta bulunan psödosklerotlar üzerinde geçirmesiyle başlamaktadır. Bu yapılar, bir sonraki üretim sezonu için başlıca primer inokulum kaynağını oluşturmaktadır (Draycott, 2016). İlkbaharda sıcaklığın yaklaşık 10 °C'nin üzerine çıkması ve nem koşullarının uygun hale gelmesiyle birlikte psödosklerotlardan konidyumlar oluşmakta; bu sporlar rüzgâr, yağmur damlaları, sulama suyu ve tarımsal faaliyetler aracılığıyla sağlıklı bitkilere taşınmaktadır (Hanson, 2019).

Yaprak yüzeyine ulaşan konidyumlar, yaklaşık %90'ın üzerindeki bağıl nem ve 25–30 °C sıcaklık koşullarında çimlenerek enfeksiyon sürecini başlatmaktadır. Oluşan çim tüpleri çoğunlukla stomalar aracılığıyla yaprak dokusuna giriş yapmakta ve mezofil dokusunda kolonize olmaktadır. Patojen, enfeksiyon sırasında ürettiği ışığa bağımlı fototoksin olan cercosporin sayesinde reaktif oksijen türlerinin oluşumunu teşvik ederek hücre zarlarında oksidatif hasara neden olmakta ve nekrotik lezyonların gelişimini başlatmaktadır (Wolf ve ark., 2021). Enfeksiyondan sonra inkübasyon süresi çevresel koşullara bağlı olarak genellikle 7–14 gün sürmektedir.

Lezyonların merkezinde gelişen konidioforlar üzerinde oluşan yeni konidyumlar, hastalık döngüsünün sekonder enfeksiyon evresini oluşturmaktadır. Bu sporlar rüzgâr, yağmur sıçraması ve sulama suyu ile çevredeki sağlıklı bitkilere taşınarak büyüme sezonu boyunca çok sayıda yeni enfeksiyon döngüsünün gerçekleşmesine neden olmaktadır. Uygun sıcaklık ve yüksek nem koşullarının devam ettiği yıllarda ardışık sekonder enfeksiyonlar kısa sürede epidemik oluşumuna yol açabilmektedir.

Türkiye'de özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında görülen yüksek sıcaklık, gece oluşan çiğ ve uzun süreli yaprak ıslaklığı, hastalık döngüsünün hızlanmasını sağlayan en önemli çevresel faktörlerdir.

3. Hastalıkla Mücadele Stratejileri

Cercospora beticola'nın yüksek genetik çeşitliliğe sahip olması, farklı çevresel koşullara kolay uyum sağlayabilmesi ve birçok ülkede fungusit direncinin yaygınlaşması nedeniyle hastalığın etkin kontrolü tek bir mücadele yöntemine dayandırılmamaktadır. Bu nedenle günümüzde sürdürülebilir hastalık yönetiminde kültürel uygulamalar, dayanıklı çeşit kullanımı, biyolojik mücadele, kimyasal mücadele ve hastalık tahmin sistemlerini birlikte içeren entegre hastalık yönetimi yaklaşımı benimsenmektedir. Bu yaklaşım yalnızca hastalık şiddetini azaltmayı değil, aynı zamanda gereksiz fungusit kullanımını önleyerek ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamayı amaçlamaktadır.

3.1. Kültürel Mücadele

Kültürel uygulamalar, hastalığın başlangıç inokulumunu azaltan ve epideminin gelişimini yavaşlatan temel mücadele yöntemleridir. *Cercospora beticola* enfekteli bitki artıkları üzerinde uzun süre canlı kalabildiğinden, aynı tarlada ardışık yıllarda şeker pancarı yetiştirilmesi önerilmemektedir. En az 3–4 yıllık münavebe uygulanması, patojen yoğunluğunu önemli ölçüde azaltmaktadır (Arioğlu, 2017). Hasat sonrasında enfekteli yaprak ve kök artıklarının derin sürümle toprağa gömülmesi veya tarladan uzaklaştırılması inokulum kaynağını azaltmaktadır. Bunun yanında aşırı azotlu gübrelemeden kaçınılması, uygun sıra arası mesafenin korunması, dengeli bitki sıklığının sağlanması ve yabancı ot kontrolünün yapılması hastalığın gelişimini sınırlandırmaktadır. Sulama yönetimi de kültürel mücadelenin önemli bir bileşenidir. Özellikle gece sulamalarından kaçınılması, yaprak ıslaklık süresinin azaltılması ve mümkün olduğunca damla sulama sistemlerinin tercih edilmesi enfeksiyon riskini önemli ölçüde düşürmektedir.

3.2. Islah Çalışmaları

Dayanıklı çeşitlerin kullanımı, *Cercospora* yaprak lekesi hastalığına karşı en ekonomik ve çevre dostu mücadele yöntemlerinden biridir. Günümüzde yürütülen ıslah çalışmaları sonucunda hastalığa karşı orta ve yüksek düzeyde tolerans gösteren çok sayıda ticari çeşit geliştirilmiştir. Türkiye'de gerçekleştirilen çalışmalar, bazı ticari çeşitlerin hastalık şiddetini önemli ölçüde azalttığını ve kimyasal mücadele ihtiyacını düşürdüğünü göstermektedir (Özdemir ve ark., 2019).

Bununla birlikte dayanıklılık çoğu zaman mutlak olmayıp kantitatif karakter göstermektedir. Ayrıca bazı yüksek toleranslı çeşitlerde verim veya şeker oranı bakımından hassas çeşitlere göre belirli düzeyde azalma görülebileceğinden, çeşit seçiminde bölgesel iklim koşulları, patojen popülasyonu ve üretim hedefleri birlikte değerlendirilmelidir. Son yıllarda genomik seleksiyon, markör destekli seleksiyon ve QTL analizleri kullanılarak *Cercospora* yaprak lekesine dayanıklılıkla ilişkili gen bölgelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

3.3. Kimyasal Mücadele

Kimyasal mücadele, hastalık riskinin yüksek olduğu dönemlerde entegre hastalık yönetiminin önemli bileşenlerinden biridir. Fungisit uygulamalarına, ekonomik zarar eşiği dikkate alınarak hastalığın ilk belirtilerinin görülmesi veya meteorolojik koşulların epidemi gelişimi açısından uygun hale gelmesi durumunda başlanmalıdır. Uygulamada, bitkilerin yaklaşık %5'inde ilk yaprak lekelerinin görülmesi ekonomik mücadele eşiği olarak kabul edilmektedir (Şeker Kurumu, 2021).

Cercospora yaprak lekesine karşı strobilurinler (QoI), triazoller (DMI), SDHI grubu fungusitler ve çoklu etki mekanizmasına sahip koruyucu fungusitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda dünyanın birçok üretim bölgesinde QoI ve DMI grubu fungusitlere karşı direnç gelişimi bildirilmiştir (Wolf ve ark., 2021). Bu nedenle aynı etki mekanizmasına sahip fungusitlerin ardışık uygulamalarından kaçınılmalı, farklı FRAC gruplarına ait aktif maddeler dönüşümlü kullanılmalı ve kimyasal mücadele diğer yönetim stratejileriyle birlikte uygulanmalıdır.

3.4. Biyolojik Mücadele

Son yıllarda biyolojik mücadele, fungusit kullanımını azaltmaya yönelik sürdürülebilir yaklaşımlar arasında önem kazanmıştır. Özellikle *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp. ve *Trichoderma* spp. gibi antagonist mikroorganizmaların; antibiyotik üretimi, besin ve yer rekabeti, mikoparazitizm, enzim üretimi ve bitkide sistemik dayanıklılığı uyarmaları sayesinde *C. beticola* gelişimini baskılayabildiği bildirilmektedir.

3.5. Entegre Hastalık Yönetimi

Cercospora yaprak lekesi hastalığı ile mücadelede en başarılı yaklaşım; kültürel uygulamalar, dayanıklı çeşit kullanımı, biyolojik mücadele, meteorolojik verilerle desteklenen hastalık tahmin modelleri ve kimyasal mücadeleyi birlikte değerlendiren entegre hastalık yönetimidir. Özellikle Disease Infection Value-Early warning system (DIV-E) ve benzeri karar destek sistemleri; sıcaklık, bağıl nem ve yaprak ıslaklık süresi gibi çevresel parametreleri analiz ederek enfeksiyon riskini tahmin etmekte ve optimum ilaçlama zamanının belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Wolf ve ark., 2021).

Entegre yönetim stratejileri sayesinde gereksiz fungusit uygulamaları azaltılmakta, direnç gelişimi yavaşlatılmakta, üretim maliyetleri düşürülmekte ve çevresel etkiler en aza indirilmektedir. Bu nedenle gelecekte hassas tarım uygulamaları, uzaktan algılama teknolojileri, yapay zekâ destekli erken uyarı sistemleri ve dayanıklı çeşit geliştirme çalışmalarının birlikte değerlendirilmesi, Cercospora yaprak lekesi hastalığının sürdürülebilir yönetiminde temel yaklaşım olacaktır.

Kaynaklar

- Arioğlu, H. (2017). *Endüstri bitkileri tarımı*. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Draycott, P. (2016). *Sugar beet: Botany, production and uses*. CABI Publishing.
- FAO. (2024). *World food and agriculture - Statistical yearbook 2024*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hanson, L. E. (2019). Fungal diseases of sugar beet: Advances in research and management. *Plant Health Progress*, 20(4), 210-225.
- McGrann, G. R., Stevanato, P., & Chiodi, C. (2021). Rhizomania in sugar beet: Genetics and management of the beet necrotic yellow vein virus. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 321-345.
- Monteiro F, Frese L, Castro S, Duarte MC, Paulo OS, Loureiro J, Romeiras MM. Genetic and Genomic Tools to Assist Sugar Beet Improvement: The Value of the Crop Wild Relatives. *Front Plant Sci*. 2018 Feb 6;9:74. doi: 10.3389/fpls.2018.00074. PMID: 29467772; PMCID: PMC5808244.
- Özdemir, S., Tunalı, B., & Kaya, R. (2019). Türkiye'de şeker pancarında *Cercospora beticola* Sacc.'nın yaygınlığı, patojenitesi ve bazı çeşitlerin dayanıklılığının belirlenmesi. *The Journal of Turkish Phytopathology*, 48(1), 1-10.
- Özgen, M. (2020). İklim değişikliğinin şeker pancarı verimi ve kalitesi üzerine etkileri Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez çalışması
- Saccardo, P. A. (1876). *Fungi Veneti novi vel critici* (Series V). Nuovo Giornale Botanico Italiano.
- Skidmore, A. J., Hanson, L. E., & Pethybridge, S. J. (2022). Fungicide resistance in *Cercospora beticola*: Challenges for global sugar production. *Pest Management Science*, 78(5), 1845-1860.
- TÜİK. (2023). *Bitkisel üretim istatistikleri*. Türkiye İstatistik Kurumu.
- Wolf, P. F., Verreet, J. A., & Hoffmann, C. M. (2021). Impact of *Cercospora beticola* on sugar beet yield and quality: A global perspective. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 128, 1-15.
- Wyatt, N. A., Spanner, R. E., & Bolton, M. D. (2024). The Complete and Gapless Genome Sequence of the Sugarbeet Pathogen *Cercospora beticola*. *Phytofrontiers*, 4(3), 434-437. <https://doi.org/10.1094/PHYTOFR-11-23-0146-A>.

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE DAYANIKLI/TOLERANSLI NOHUT GENOTİPLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

ÖMER SÖZEN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas-Türkiye
omers@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0001-5528-7887

YETER ÇİLESİZ

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas-Türkiye
ycilesiz@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0002-4313-352X

TOLGA KARAKÖY

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bitki Koruma Bölümü, Sivas-Türkiye
tkarakoy@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0002-5428-1907

ÖZET

Sivas ekolojik koşullarında bazı nohut genotip/çeşitlerinin iklim değişikliğine dayanıklılık ve tolerans düzeylerinin ortaya konulması amacıyla 2025 yılında Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarımsal Araştırma ve Uygulama Arazine ait deneme arazisinde tesadüf blokları deneme deseninde 3 tekerrürlü olacak şekilde yürütülen çalışmada, 15 adet nohut genotipi ile 3 adet nohut çeşidi (Aksu, Azkan ve Uzunlu 99) kullanılmıştır. 1 yıl süre ile yürütülen araştırmada agronomik özellikler olan bitki boyu (cm), ilk bakla yüksekliği (cm), biyolojik verim (g), bitkide bakla sayısı (adet), bitkide tane sayısı (adet), yüz tane ağırlığı (g), hasat indeksi (%) ve bitkide tane verimi (g) incelenmiştir. Yürütülen araştırma sonucunda nohut genotip/çeşitlerinin 2.29-5.25 g arasında bitkide tane verimine sahip oldukları belirlenmiş olup en yüksek bitkide tane verimi N-13 nolu nohut genotipinden elde edilirken en düşük bitkide tane verimi ise N-6 nolu nohut genotipinde görülmüştür. Tüm nohut genotip/çeşitlerinin ortalama bitkide tane verim değerlerinin ise 2.93 g olduğu saptanmıştır. Bunun yanında nohut genotip/çeşitlerine bağlı olarak bitki boyunun 24.40-35.20 cm, ilk bakla yüksekliğinin 12.00-22.00 cm, bitkide bakla sayısının 6.20-14.00 adet, bitkide tane sayısının 5.40-14.00 adet, yüz tane ağırlığının 33.61-43.52 g ve biyolojik verimin 4.34-10.38 g aralığında değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sivas, Nohut, Çeşit, Genotip, Agronomik Özellikler

**DEVELOPMENT OF CLIMATE CHANGE-RESILIENT/TOLERANT
CHICKPEA GENOTYPES**

ABSTRACT

This study was conducted in 2025 under the ecological conditions of Sivas to determine the resilience and tolerance levels of certain chickpea genotypes/cultivars to climate change. The experiment was carried out at the experimental field of Sivas University of Science and Technology, Agricultural Research and Application Area, using a randomized complete block design with three replications. A total of 15 chickpea genotypes and 3 registered cultivars (Aksu, Azkan, and Uzunlu 99) were used as plant material. In this one-year study, agronomic traits including plant height (cm), first pod height (cm), biological yield (g), number of pods per plant, number of seeds per plant, hundred-seed weight (g), harvest index (%), and seed yield per plant (g) were evaluated. The results revealed that seed yield per plant among chickpea genotypes/cultivars ranged from 2.29 to 5.25 g. The highest seed yield per plant was obtained from the chickpea genotype N-13, whereas the lowest value was recorded in genotype N-6. The average seed yield per plant across all genotypes/cultivars was determined to be 2.93 g. Additionally, depending on the chickpea genotypes/cultivars, plant height ranged from 24.40 to 35.20 cm, first pod height from 12.00 to 22.00 cm, number of pods per plant from 6.20 to 14.00, number of seeds per plant from 5.40 to 14.00, hundred-seed weight from 33.61 to 43.52 g, and biological yield from 4.34 to 10.38 g.

Keywords: Sivas, Chickpea, Variety, Genotype, Agronomic Features

1. GİRİŞ

Küresel ısınma sonucu oluşan iklim değişiklikleri, etkileri ve sonuçları bakımından dünyanın tümünü yakından ilgilendiren önemli bir problem niteliğinde olup küresel ısınmanın temel sebebinin ekonomik faaliyetler sonucunda atmosferdeki sera gazının yoğunlaşarak olması gereken düzeyin üzerinde seyretmesi olarak görülmektedir. İklim değişikliklerine bağlı olarak atmosferin giderek ısınması sonucunda; buzulların erimesi ve deniz seviyesinin yükselmesi, bölgesel ve yerel yağış yapılarının değişmesi, ekstrem hava olaylarının sayı ve sıklığının artması, ekosistemlerin değişmesi nedeniyle bazı hayvan ve bitki türlerinin yok olmasına, sel, fırtına, kasırga ve kuraklık gibi iklimle ilgili doğal felaketlerin artmasına neden olacağı tahmin edilmektedir. Yukarıda belirtilen etkilerin pek çoğu, günümüzde halen ülkemiz başta olmak üzere tüm dünyada gözlenebilmekte ve sera gazı emisyonlarının artmasına bağlı olarak söz konusu etkilerin daha sonraki yıllarda giderek artacağı ön görülmektedir. İklim değişikliklerinin etkilediği başlıca sektörler arasında; gıda üretimi, balıkçılık, hayvancılık ve ormancılığı içine alan tarımsal faaliyetler ile diğer ekonomik ve sanayi faaliyetler gelmektedir. Bu faaliyetler içinde tarım sektörü; milli gelir, istihdam, dış ticaret, tarıma dayalı sanayi, destekleme ve tüketim harcamaları içindeki payı ile insanların zorunlu gıda maddelerini üreten bir sektör olması nedeniyle, ekonomilerde önemli bir yere sahiptir. Tarım doğaya bağlı olarak sürdürülen bir faaliyettir, teknoloji ne kadar gelişse de bu özelliğini kaybetmesi mümkün değildir. Tarımın ekonomik bir faaliyet olması, iklim değişikliği ile ortaya çıkacak üretim ile teknolojiye bağlı değişimler, hem ülke hem de uluslararası ticaret açısından önemlidir.

Ülkemizde son zamanlarda küresel ısınma sonucu oluşan iklimsel faktörlere karşı dayanıklı başta tarla bitkileri türlerinde olmak üzere bitkisel üretim kapsamında yüksek sıcaklıklar ile kuraklığı içine alan biyotik/abiyotik faktörlere karşı dayanıklı genotiplerin geliştirilme çalışmalarına hız verilmiştir. Bu tarla bitkileri türleri içinde yer alan ve baklagil bitkileri arasında bulunan nohut bunlardan sadece bir tanesidir. Kurak koşullara dayanıklılığı nedeniyle kurak alanlarda başarılı bir şekilde yetiştiriciliği yapılabilen nohudun ülkemizdeki ekim alanlarının büyük bir kısmını İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi oluşturmakta olup aynı zamanda nohuttan elde edilen tane veriminin yanında kaliteli samanı ile hayvan yemi olarak da değeri oldukça büyüktür (Biçer ve Şakar, 2011). İnsan ve hayvan beslemesinin yanında toprak üstü habitus ve kök yapısı nedeniyle toprak koruyucu özelliğine de sahip olan nohudun özellikle son yıllarda giderek etkisi artmaya başlayan ve bir abiyotik faktör olan kuraklıktan dolayı oluşan iklimsel değişimlere karşı erkencilik özelliğiyle de öne çıkmaktadır.

Nohut, tanelerindeki yüksek protein (%20-25), karbonhidrat (%40-60), yağ (%4.5-5.5), selüloz (%1.6-9.0), önemli esansiyel amino asitleri (alanin, izolösin, lisin, lösin, triptofan, valin), makro ve mikro elementleri (K, P, Ca, Mg, S, Fe, Mn) ile önemli vitamin (A, B, B1, C ve D) içeriklerine sahip olmakla beraber yemeklik tane baklagiller içinde yağ oranı (%4-5) bakımından en yüksek olanıdır. Besin değerinin yüksek olmasının yanı sıra nohut, tarımsal açıdan önemli bir münavebe baklagil bitkisidir. Yetiştirildikleri toprağa olumlu etkilerde bulunması, derin köklü olması, köklerinde ortak yaşayan *Rhizobium* bakteriler sayesinde havadaki serbest azotu toprağa bağlaması, bitki besin maddelerince zenginleştirmesi ve sürdürülebilir tarımın popüleritesi gibi özelliklerden dolayı nohut başta olmak üzere yemeklik tane baklagillerin tarla ziraatında önemi daha da artmaktadır (Güler, 2009). Tarımsal açıdan azotlu gübrelemeye ihtiyacının hiç bulunmaması ya da diğer bitkilere göre çok az olması nedeniyle nohudun karbon salınımı düşük olup bu nedenle çevre dostu bir bitkidir. Küresel iklim değişikliğine bağlı sıcaklık artışı ve dikkatsiz bir şekilde kullanılan sulama suyu problemi gittikçe artmaktadır. Kurak alanların artmasıyla birlikte yemeklik tane baklagillerin su tutma potansiyellerinin fazla olması ve toprağın çok fazla ısınmasını engellemeleri açısından oldukça önemlidirler (Sayılğan ve ark., 2022). Yemeklik tane baklagiller içerisinde kuraklığa ve sıcaklığa mercimekten sonra en dayanıklı baklagil bitkisi olması, toprak isteği bakımından fazla seçici olmaması, drenajı iyi, hafif asit veya alkali reaksiyonlu kireçli ve kıraç topraklarda rahatlıkla yetişebilmesi bakımından nohudun kışları ılık geçen bölgelerimizde kışlık, kışları sert geçen Orta Anadolu ve Geçit Bölgelerimizde ise yazlık olarak yetiştiriciliği yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında; nohut genotipleri içinden iklim değişikliklerine karşı dayanıklı genotiplerin Türk tarımına sunulması hedeflenmiştir. Böylece, ülkemizde iklim değişikliklerine karşı geliştirilecek nohut genotiplerinin Türk tarımına sunulmasıyla ön görülen iklim değişikliği senaryolarına karşı germplasmın oluşturularak tüm ıslah programlarında kullanılarak önü açılmış olacaktır.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. MATERYAL

Bu araştırmanın tarla denemeleri 2025 yılında bir yıl süre ile nohut vejetasyonu döneminde Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'ne bağlı AR-GE Tarımsal Araştırma Merkezi'nin ıslah amaçlı deneme arazisinde yürütülmüştür. Araştırma yerinin denizden yüksekliği 1285 m olup 39.72072 enlem ve 36.91786 boylam dereceleri arasında yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Araştırmanın yürütüldüğü deneme arazisi

BAP Projesi kapsamında farklı lokasyonlardan toplanan yerel nohut köy popülasyonları içinden tekseleleksiyon metodu ile ileri düzeye kadar getirilen 15 adet nohut genotipi ile nohut genotipleri ile kıyaslama yapmak üzere 3 adet nohut (Aksu, Azkan ve Uzunlu 99) çeşidi araştırmanın materyali olarak belirlenmiştir (Tablo 1 ve 2).

Tablo 1. Araştırmada materyal olarak kullanılan nohut çeşitleri

ÇEŞİTLER	AZKAN	AKSU	UZUNLU 99
Tescil Yılı	1998	2009	1999
Çeşit Sahibi Kuruluş	GKTAE (Eskişehir)	DAGKTAE (Kahramanmaraş)	TARM (Ankara)
Bitki Boyu (cm)	41-46	45-50	50-55
Büyüme Şekli	dik	yarı dik	dik
100 Tane Ağırlığı (g)	42.5-49.9	45-47	44-46
Bitkide Bakla Sayısı (adet)	24-30	24-30	28-32
Verim (kg/da)	130-210	175-200	150-175
Tohum Şekli	koçbaşı	koçbaşı	koçbaşı
Tohum Rengi	bej	bej	bej

Tablo 2. Araştırmada materyal olarak kullanılan nohut genotipleri

Sıra No	Nohut Genotipleri
1	N-1
2	N-2
3	N-3
4	N-4
5	N-5
6	N-6
7	N-7
8	N-8
9	N-9
10	N-10
11	N-11
12	N-12
13	N-13
14	N-14
15	N-15

Araştırma Yerinin İklim Özellikleri

Denemenin kurulduğu lokasyonun nohut vejetasyonu dönemine ait uzun yıllar ortalaması (2000-2024 yılları arası) ile çalışmanın gerçekleştirildiği 2025 yılına ait meteorolojik veriler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Sivas ilinin 2025 yılı ile uzun yıllara ait iklim verileri

Aylar	Ortalama Sıcaklık (° C)		Toplam Yağış (mm)		Ortalama Nispi Nem (%)	
	2025	Uzun Yıllar	2025	Uzun Yıllar	2025	Uzun Yıllar
Nisan	10.1	9.3	72.6	59.0	67.9	68.2
Mayıs	13.0	13.5	66.3	52.4	62.7	60.9
Haziran	18.8	17.3	15.4	43.4	60.1	58.7
Temmuz	22.1	20.0	2.4	6.2	55.8	53.9
Ağustos	24.2	20.2	3.1	4.5	57.2	53.3
Toplam			159.8	165.5		
Ortalama	17.64	16.06			60.74	59.0

Tablo değerlendirildiğinde uzun yıllara ait ortalama değerler ile denemelerin kurulduğu 2025 yılına ait aylık sıcaklık ortalamaları arasında aylar kapsamında büyük bir farkın olmadığı görülmektedir. Uzun yıllar ortalaması, en düşük aylık sıcaklık ortalamasının 9.3 °C ile Nisan ayında, aylık en yüksek sıcaklık ortalamasının ise 20.2 °C ile Ağustos ayında olduğu görülmüştür. 2025 yılına ait deneme periyotlarındaki bu değerler 10.1 °C ile Nisan ve 24.2 °C ile Ağustos aylarında sıralanmıştır. Bunun yanında 2025 yılı aylık toplam yağış değerlerinde Nisan ve Mayıs ayları aylık yağış toplamalarının uzun yıllardan aynı aylara göre yüksekte kaldığı geriye kalan ayların ise uzun yıllar ortalamasının altında seyrettiği, aylık ortalama nisbi nem verileri gözlemlendiğinde ise uzun yıllar ortalama verileri ile deneme yılının birbirine yakın değerler elde ettikleri görülmüştür.

Toprak Özellikleri

Çalışmanın bir yıl olarak yürütüldüğü deneme parselinin toprak ögeleri incelendiğinde deneme parselinin toprağının alkali seviyesinin hafif (7.25), organik madde içeriğinin orta (%1.65), alınabilir fosfor (3.50) ve potasyum düzeyleri (92.45) bakımından orta, tuz seviyesinin tuzlu (%0.31) ve kireç içeriğinin ise kireçli (18.8) olduğu ortaya konulmuştur (Tablo 4).

Tablo 4. Deneme yeri toprağına ait fiziksel ve kimyasal özellikleri

Yıllar	Tekstür	pH	Kireç (% CaCO ₃)	Toplam Tuz (%)	Fosfor (P ₂ O ₅)	Potasyum (K ₂ O)	Organik Madde (%)
2025	Siltli killi tın	7.25	18.8	0.31	3.50	92.45	1.65

2.2. METOT

Araştırmanın yürütüldüğü deneme arazisinin ön bitkisi şeker pancarı olup şeker pancarının hasadı sonrasında pullukla sürülerek kış yağmurlarına bırakılmıştır. Ekim öncesinde deneme arazisine önce diskaro sokularak yabancı otlardan arındırılmış ardından rotovator ile ekim için hazır hale getirilmiştir. Araştırma, Tesadüf Blokları Deneme Deseninde 3 tekerrürlü olacak şekilde kurulmuş olup parseller 5.0 m x 1.2 m = 6.0 m² ebatlarına sahiptir. 15 adet nohut genotipi ile 3 adet standart çeşit olmak üzere toplam 18 adet genotip/çeşidin parsellere dağıtımı tesadüfi olarak yapılmıştır. Denemenin ekimleri 24 Nisan 2025 tarihinde tavlı toprağına gerçekleştirilmiştir. Ekimler 30 cm sıra aralığında 8 cm sıra üzerinde, her bir sıraya 60 adet tohum düşecek şekilde markörle açılan sıralara 3-5 cm derinliğe elle yapılmıştır. Her parsel 4 sıradan oluşmuştur. Yabancı otlarla mücadele etmek üzere ekim sonrası çıkış öncesi *isoxaflutole* etken maddeli yabancı ot ilacı uygulanmış olup vejetasyon süresince 2 kez çapa yapılmıştır. Deneme alanına ekimle beraber dekara 15 kg DAP (2.7 kg N/da ve 6.9 kg P₂O₅) gübresi uygulanmıştır. Yürütülen araştırmada deneme alanında yer alan nohut genotiplerinin hasadı hasat olgunluğına ulaşmış oldukları dönem aralığı olan 4-16 Ağustos tarihleri arasında el ile yapılmıştır. Dörder sıradan oluşan her parselin

her iki yanından birer sıra ile parsel başı ve sonundan 50 cm'lik kısımlar kenar tesiri olarak atılmak suretiyle 4.0 m x 0.6 m= 2.4 m²'lik alanda yer alan bitkiler hasat edilmiştir. Her bir parselden hasat edilen bitkiler ayrı ayrı çuvalara konulup etiketlenerek hasat-harman sonrası gerekli ölçümler ve analizler yapılmak üzere Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümüne ait harman odasına getirilmiştir.

Verilerin Değerlendirilmesi

Araştırma sonucunda elde edilen veriler Tesadüf Blokları Deneme Desenine göre JUMP 13.0 istatistik programı ile varyans analizine tabi tutulup ortalamalar arasındaki farklılıklar LSD Çoklu Karşılaştırma Yöntemi'ne göre belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Bitki Boyu (cm)

15 adet nohut genotipi ile 3 adet standart nohut çeşidi olmak üzere toplam 18 adet nohut genotip/çeşidinin ortalama bitki boyu değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Varyans analiz sonucunda incelenen özelliklerden olan bitki boyu bakımından genotip ile çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiş olup tüm nohut genotip/çeşitlerinin ortalama bitki boyunun 29.83 cm olduğu görülmüştür. Çalışmada yer alan standart nohut çeşitleri bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bitki boyunun 31.00 cm ile Aksu çeşidinden elde edildiği ortaya konulmuş olup, en düşük bitki boyu ise 29.40 cm değeri ile Azkan nohut çeşidinde tespit edilmiş olup standart nohut çeşitlerinin ortalama bitki boyu değeri ise 30.40 cm olarak belirlenmiştir. Yürütülen araştırmada yer alan 15 adet nohut genotipi kendi içinde değerlendirildiğinde ise en yüksek bitki boyu N-1 nolu genotipinde 35.20 cm olarak tespit edilirken bunu "b" grubunda yer alan N-4, N-15 ve N-6 nolu nohut genotipleri izlemiştir. Çalışmada en düşük bitki boyu ise N-10 nolu genotipte (24.40 cm) belirlenmiş olup tüm nohut genotiplerinin ortalama bitki boyunun ise 29.72 cm olduğu görülmüştür. Nohut genotiplerinin ortalaması olan bu değer, standart nohut çeşitleri ortalaması (30.40 cm) ile genotip ve çeşitlerin tümünün ortalama değerine (29.83 cm) yakındır.

Tablo 5. Denemede yer alan nohut genotip/çeşitlere ait bitki boyu (cm) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BB	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BB
1	N-13	30.20 d	10	N-8	28.40 f
2	N-9	31.40 bc	11	N-14	31.40 bc
3	N-3	30.20 d	12	N-4	31.80 b
4	Azkan	29.40 ef	13	N-11	25.80 ı
5	N-10	24.40 j	14	N-12	27.80 g
6	N-5	29.60 e	15	N-1	35.20 a
7	N-15	31.80 b	16	Uzunlu-99	30.80 cd
8	N-7	27.00 h	17	N-2	29.20 efg
9	Aksu	31.00 c	18	N-6	31.60 b
Minimum - Maximum		24.40-35.20			
Genotip Ortalaması		29.72			
Çeşit Ortalaması		30.40			
Genel Ortalama		29.83			
Önemlilik		**			

Bu agronomik parametre üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Çiftçi ve ark. (2004) Van ekolojik koşullarında 24.20-38.20 cm, Kaçar ve ark. (2005) Bursa ekolojik koşullarında 62.10-80.70 cm, Öztaş (2006) Harran Ovası koşullarında 38.66-47.66 cm, Öztaş ve ark. (2007) Harran ovasında 38.66-45.00 cm, Babagil (2010) Muş ekolojik koşullarında 36.70-43.10 cm, Babagil (2011) Erzurum ekolojisinde 42.60-49.70 cm, Bakoğlu (2011) Bingöl ekolojik koşullarında 24.70-32.90 cm, Uzun ve ark. (2012) Amasya ekolojik koşullarında 34.00-40.25 cm, Erden (2014) Siirt/Tillo ekolojik koşullarında 38.10-

52.80 cm, Ceran (2015) Konya/Sarayönü ekolojik koşullarında 34.67-57.33 cm, Bayrak ve Önder (2017) Konya ekolojisinde 30.45-40.05 cm, Biçer ve ark. (2017) Diyarbakır ekolojik koşullarında 44.50-53.70 cm, Yiğit (2018) Kırşehir ekolojik koşullarında 32.25-40.69 cm, Topçu (2019) Edirne ekolojik koşullarında 38.50-66.37 cm ve Demir ve Bildirici (2020) Şanlıurfa ekolojik koşullarında 39.00-48.30 cm arasında değerleri elde etmişlerdir. Yürütülen çalışmada bitki boyu üzerine elde edilen değerlerin (24.40-35.20 cm), araştırmacıların bu parametre üzerine yürüttükleri çalışmalarda elde ettikleri değerler aralığında (24.20-80.70 cm) yer aldığı belirlenmiş olup çalışmamızla paralellik göstermektedir.

3.2. İlk Bakla Yüksekliği (cm)

18 adet nohut genotipi/çeşidin ortalama ilk bakla yüksekliği değerlerine ait veriler Tablo 6'da verilmiştir. Varyans analiz sonucunda incelenen özelliklerden olan ilk bakla yüksekliği bakımından genotip ile çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiş olup tüm nohut genotip/çeşitlerin ortalama ilk bakla yüksekliğinin 15.52 cm olduğu belirlenmiştir. Çalışmada yer alan standart nohut çeşitleri bakımından Tablo incelendiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek ilk bakla yüksekliğinin "cd" istatistiki grubunda bulunan 17.40 cm ile Uzunlu 99 nohut çeşidinden elde edildiği görülmüş olup bu çeşidi 15.80 cm ilk bakla yükseklik değeri ile Aksu çeşidi izlemiştir. Tüm çeşitler içinde en düşük ilk bakla yükseklik değeri ise 12.60 cm ile Azkan çeşidinde tespit edilmiş olup standart nohut çeşitlerinin ortalama ilk bakla yükseklik değerinin ise 15.26 cm olduğu ortaya konulmuştur.

Tablo 6. Denemede yer alan nohut genotip/çeşitlere ait ilk bakla yüksekliği (cm) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	İBY	Sıra No	Genotip/Çeşitler	İBY
1	N-13	15.60 efg	10	N-8	12.40 hj
2	N-9	16.20 e	11	N-14	17.00 d
3	N-3	14.20 g	12	N-4	16.60 de
4	Azkan	12.60 hi	13	N-11	12.00 i
5	N-10	15.60 efg	14	N-12	17.80 c
6	N-5	15.00 f	15	N-1	22.00 a
7	N-15	15.00 f	16	Uzunlu-99	17.40 cd
8	N-7	12.40 hj	17	N-2	13.00 h
9	Aksu	15.80 ef	18	N-6	18.80 b
Minimum - Maximum		12.00-22.00			
Genotip Ortalaması		15.57			
Çeşit Ortalaması		15.26			
Genel Ortalama		15.52			
Önemlilik		**			
CV (%)		10.55			

Yürütülen çalışmada yer alan 15 adet nohut genotipi ilk bakla yüksekliği bakımından kendi içinde değerlendirildiğinde ise en yüksek ilk bakla yüksekliği N-1 nolu genotipte 22.00 cm olarak belirlenirken bu nohut genotipini "b" grubunda yer alan N-6 nolu genotip (18.80 cm) izlemiştir. En düşük ilk bakla yükseklik değeri ise N-11 nolu genotipte tespit edilmiş olup tüm nohut genotiplerinin ortalama ilk bakla yüksekliğinin ise 15.57 cm olduğu ortaya konulmuştur. Nohut genotiplerinin ortalaması olan bu değer, standart nohut çeşitleri ortalaması olan 15.26 cm ile genotip ve çeşitlerin tümünün ortalaması olan 15.52 cm değerinin üstünde kaldığı görülmüştür. Bu agronomik parametre üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Kıbık (2022) Kayseri ekolojik koşullarında 23.00-34.30 cm, Biçer ve Anlarsal (2005) Diyarbakır ekolojik koşullarında 20.80-27.80 cm, Mart ve ark. (2005) Çukurova ekolojik koşullarında 35.20-39.47 cm, Öztaş (2006) Harran ekolojik koşullarında 21.00-32.00 cm, Yolcu (2008) Diyarbakır ekolojik koşullarında 17.60-24.50 cm, Babagil (2010) Muş ekolojik koşullarında 19.80-26.50 cm, Yaşar (2010) Güneydoğu Anadolu ekolojik koşullarında 15.27-20.20 cm, Karaköy (2011) Çukurova ekolojik koşullarında 23.20-30.40 cm, Beysarı (2012) Bingöl ekolojik koşullarında 20.80-29.90 cm, Erdin (2013) Gevaş/Van ekolojik koşullarında 22.56-24.96 cm, Karakan Kaya (2014) Elazığ ekolojik koşullarında

24.40-35.10 cm, Güneş (2016) Kahramanmaraş ekolojik koşullarında 23.70-24.00 cm, Çerikçi (2017) Kahramanmaraş ekolojik koşullarında 25.50-38.60 cm, Gündoğdu Gürbüz (2018) Doğu Anadolu ekolojik koşullarında 14.00-28.20 cm, Aydoğan (2019) Eskişehir ekolojik koşullarında 29.50-38.00 cm, Beykara (2019) Bingöl ekolojik koşullarında 16.80-24.60 cm, Çolak (2019) Kahramanmaraş ekolojik koşullarında 27.70-29.50 cm, Gürbak (2019) Kahramanmaraş ekolojik koşullarında 25.73-31.20 cm, Topçu (2019) Uzunköprü/Edirne ekolojik koşullarında 11.50-30.90 cm, Demirci ve Bildirici (2020) Şanlıurfa ekolojik koşullarında 28.8-38.8 cm, Karadavut ve Sözen (2020b) Kırşehir ekolojik koşullarında 16.30-28.30 cm, Uçar (2020) Siirt ekolojik koşullarında 29.5-36.7 cm, Güngör ve ark. (2021) Kırklareli ve Edirne ekolojik koşullarında 17.90-30.50 cm ve Özcan (2021) İdil/Şırnak ekolojik koşullarında 14.50-30.00 cm arasında değerleri elde etmişlerdir. Yürütülen araştırmada ilk bakla yüksekliğine ait elde edilmiş olan değerler (12.00-22.00 cm), bu agronomik parametre üzerine çalışmalar yürüten araştırmacılara ait değerler aralığında (11.50-39.47 cm) olup yürütülen çalışma ile paralellik göstermektedir. Yukarıda verilmiş çalışmaların bazılarında ilk bakla yüksekliğine ait değerler, yürütmüş olduğumuz çalışmamızdan daha fazla olarak gerçekleşirken bazı çalışmalarda ise ilk bakla yükseklik değerleri daha az elde edilmiştir. Elde edilen bu farklı değerlerin yürütülen çalışmalarda yer alan genotip/çeşitlerin genetik kabiliyetlerinin yanında ekolojik ve iklimsel farklılıklar, kışlık ve yazlık ekimler ile kültürel uygulamaların farklı şekillerde kullanılmasından kaynaklanmış olabileceği ön görülmektedir.

3.3. Bitkide Bakla Sayısı (adet)

Teksel seleksiyon metodu ile seçilen 15 adet nohut genotipi ile 3 adet standart nohut çeşidi olmak üzere toplam 18 adet nohut genotip/çeşidinin ortalama bitkide bakla sayısı değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Varyans analiz sonucunda incelenen özelliklerden olan bakla sayısı bakımından genotip ile çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiş olup tüm nohut genotip/çeşitlerin ortalama bitkide bakla sayısının 8.36 adet olduğu görülmüştür. Çalışmada yer alan standart nohut çeşitleri bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bitkide bakla sayısının 9.80 adet ile Azkan çeşidinden elde edildiği ortaya konulmuş olup, en düşük bitkide bakla sayısı ise 7.00 adet değeri ile Uzunlu 99 nohut çeşidinde tespit edilmiş olup standart nohut çeşitlerinin ortalama bitkide bakla sayısı değeri ise 8.00 adet olarak belirlenmiştir.

Tablo 7. Denemede yer alan nohut genotip/çeşitlere ait bitkide bakla sayısı (adet) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BBS	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BBS
1	N-13	7.40 gh	10	N-8	6.20 ı
2	N-9	7.40 gh	11	N-14	5.80 ıj
3	N-3	11.40 b	12	N-4	9.00 de
4	Azkan	9.80 cd	13	N-11	6.40 hı
5	N-10	7.20 ghı	14	N-12	7.20 ghı
6	N-5	8.60 f	15	N-1	14.20 a
7	N-15	8.80 def	16	Uzunlu-99	7.00 h
8	N-7	9.20 d	17	N-2	10.20 c
9	Aksu	7.20 ghı	18	N-6	7.60 g
Minimum - Maximum		5.80-14.20			
Genotip Ortalaması		8.44			
Çeşit Ortalaması		8.00			
Genel Ortalama		8.36			
Önemlilik		**			
CV (%)		12.98			

Yürütülen araştırmada yer alan 15 adet nohut genotipi kendi içinde değerlendirildiğinde ise en yüksek bakla sayısı N-1 nolu genotipte 14.20 adet olarak tespit edilirken bunu “b” grubunda yer alan N-3 ve “c” grubunda yer alan N-2 nolu nohut genotipler izlemiştir. Çalışmada en düşük bitkide bakla sayısı ise N-14 nolu genotipte (5.80 adet) belirlenmiş olup tüm nohut genotiplerinin ortalama bitkide

bakla sayılarının ise 8.44 adet olduğu görülmüştür. Nohut genotiplerin ortalaması olan bu değer, standart nohut çeşitleri ortalaması (8.00 adet) ile genotip ve çeşitlerin tümünün ortalama değerinin (8.36 adet) üstündedir. Bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer bilimsel çalışmalarda Altınbaş ve Sepetoğlu (2001) Bornova ekolojik koşullarında 24.80-30.50 adet, Biçer (2001) Diyarbakır ekolojik koşullarında 15.30-34.70 adet, Arshad ve ark. (2002) İslamabad/Pakistan ekolojik koşullarında 19.30-41.50 adet, Çiftçi ve ark. (2004) Van ekolojik koşullarında 6.50-18.40 adet, Biçer ve Anlarsal (2005) Diyarbakır ekolojik koşullarında 9.20-44.80 adet, Kaçar ve ark. (2005) Bursa ekolojik koşullarında 18.60-40.50 adet, Kayan (2005) Orta Anadolu koşullarında 11.50-18.33 adet, Bakoğlu ve Ayçiçek (2005) Bingöl ekolojik koşullarında 9.40-17.00 adet, Şanlı (2007) Isparta ekolojik koşullarında 15.70-37.30 adet, Karaköy (2008) Çukurova ekolojik koşullarında 19.20-37.90 adet, Babagil (2010) Muş ekolojik koşullarında 21.60-25.50 adet, Bakoğlu (2011) Bingöl ekolojik koşullarında 6.10-15.00 adet, Biçer ve Şakar (2011) Diyarbakır ekolojik koşullarında 12.80-39.40 adet, Erden (2014) Tillo/Siirt ekolojik koşullarında 8.03-19.30 adet, Fiaz ve ark. (2016) Pakistan ekolojik koşullarında 50.50-69.60 adet, Biçer ve ark. (2017a) Diyarbakır ekolojik koşullarında 18.60-28.00 adet, Çerikci (2017) Kahramanmaraş ekolojik koşullarında 48.80-80.80 adet, Gündoğdu Gürbüz (2018) Doğu Anadolu Bölgesi koşullarında 9.00-16.00 adet, Oğuz (2018) Siirt ekolojik koşullarında 10.30-23.30 adet, Sözen ve Karadavut (2018) Kırşehir ekolojik koşullarında 8.00-32.00 adet, Aldemir (2019) Dinar/Afyonkarahisar ekolojik koşullarında 30.37-50.37 adet, Doğan ve ark. (2019) Mardin ekolojik koşullarında 32.00-46.70 adet, Topçu (2019) Uzunköprü/Edirne ekolojik koşullarında 25.03-261.50 adet, Karadavut ve Sözen (2020) Kırşehir ekolojik koşullarında 12.80-25.00 adet, Karaköy ve Sözen (2022) Sivas ekolojik koşullarında 17.67-22.76 adet ve Şakar (2022) İdil/Şırnak ekolojik koşullarında 10.46-27.38 adet değerlerini tespit etmişlerdir. Yürütülen çalışmada bitkide bakla sayısı üzerine elde edilen değerler (5.80-14.20 adet), araştırmacıların bu parametre üzerine yürüttükleri çalışmalarda elde ettikleri değer aralığında (6.10-261.50 adet) yer almakta olup çalışmamızla paralellik göstermekte olup yürütülen çalışmada tarafımızdan elde edilen bitkide bakla sayısı değerlerinden bitkide bakla sayısı yüksek olan değerler ile bitkide bakla sayısı düşük olan değerlerin yer alması, araştırmacılar tarafından çalışmalarındaki nohut genotiplerinin farklı genetik özelliklerinin yanında farklı ekolojik şartlardan da etkilendiğinin bir sonucu olduğu görülmektedir.

3.4. Bitkide Tane Sayısı (adet)

Saf hat seleksiyon yöntemi ile seçilen 15 adet nohut genotipi ile 3 adet standart nohut çeşidi olmak üzere toplam 18 adet nohut genotipi/çeşidin ortalama bitkide tane sayısı değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Varyans analiz sonucunda incelenen özelliklerden olan bitkide tane sayısı bakımından genotip ile çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiş olup tüm nohut genotip/çeşitlerin ortalama bitkide tane sayısının 7.65 adet olduğu görülmüştür. Çalışmada yer alan standart nohut çeşitleri bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bitkide tane sayısı 8.80 adet ile Azkan çeşidinden elde edilirken bu çeşidi 6.40 adet ile Aksu izlemiştir. Çeşitler içerisinde en düşük bitkide tane sayısı değeri ise 5.40 adet ile Uzunlu 99 çeşidinde ortaya konulmuş olup standart nohut çeşitlerinin ortalama bitkide tane sayısı değerinin ise 6.86 adet olduğu tespit edilmiştir. Yürütülen çalışmada yer alan 15 adet nohut genotipi bitkide tane sayısı bakımından kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise en yüksek bitkide tane sayısı N-1 nolu genotipte 14.40 adet olarak belirlenirken bu genotipi "b" grubunda yer alan N-3 nolu genotip (10.20 adet) izlemiştir. En düşük bitkide tane sayısı değeri ise N-15 nolu genotipte (5.40 adet) tespit edilmiş olup tüm nohut genotiplerinin ortalama bitkide tane sayısı ise 7.81 adet olduğu ortaya konulmuştur. Nohut genotiplerin ortalaması olan bu değer, standart nohut çeşitleri ortalaması olan 6.86 adet ile genotip ve çeşitlerin tümünün ortalaması olan 7.65 adet değerini geçtiği tespit edilmiştir. Bu agronomik parametre üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Kulaz (1991) Van ekolojik koşullarında 1.53-5.23 adet, Cinsoy ve ark. (1997) Ege Bölgesi ekolojik koşullarında 6.20-66.60 adet, Karasu ve ark. (1999) Isparta koşullarında 5.95-10.63 adet, Soylu (1999) Ankara ekolojik koşullarında 26.27-34.34 adet, Biçer (2001) Diyarbakır ekolojik koşullarında 15.07-49.47 adet, Kaçar ve ark. (2005) Bursa ekolojik koşullarında 21.40-48.90 adet, Yeşilgün (2006) Çukurova ekolojik koşullarında 43.80-131.30 adet, Şanlı (2007) Isparta ekolojik koşullarında 14.10-36.30 adet, Yaşar (2010) Güneydoğu Anadolu Bölgesi ekolojik koşullarında 12.47-16.80 adet, Biçer ve Şakar (2022) Diyarbakır ekolojik koşullarında 11.80-63.40 adet, Beysarı (2012) Bingöl ekolojik koşullarında 15.90-29.80 adet, Şeybeoğlu (2017) Van ekolojik koşullarında 6.77-8.04

adet, Yiğit (2018) Kırşehir ekolojik koşullarında 16.91-23.51 adet, Tetik (2019) Bolu ekolojik koşullarında 8.20-20.06 adet, Soysal (2020) Siirt ekolojik koşullarında 14.70-33.10 adet, Üyetürk (2020) Fethiye/ Muğla ekolojik koşullarında 26.00-29.20 adet, Demir (2021) Diyarbakır ekolojik koşullarında 44.40-53.20 adet, Güngör ve ark. (2021) Kırklareli ve Edirne koşullarında 19.10-38.90 adet, Sözen ve ark. (2021) Eskişehir ekolojik koşullarında 22.20-46.40 adet, Yücedağ (2021) Bozova/Şanlıurfa ekolojik koşullarında 22.00-46.20 adet, Kıbık (2022) Kayseri ekolojik koşullarında 16.00-30.67 adet, Özcan ve Yücel (2022) İdil/Şırnak ekolojik koşullarında 13.30-44.90 adet ve Sarımurat ve ark. (2022) Van ekolojik koşullarında 10.40-21.40 adet arasında değişen değerleri elde etmişlerdir. Yürütülen araştırmada bitkide tane sayısına ait elde edilmiş olan değerler (5.40-14.40 adet), bu agronomik parametre üzerine çalışmalar yürüten araştırmacılara ait değerler aralığında (1.53-131.30 adet) olup yürütülen çalışma ile paralellik göstermektedir.

Tablo 8. Denemede yer alan nohut genotip/çeşitlere ait bitkide tane sayısı (adet) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BTS	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BTS
1	N-13	7.20 e	10	N-8	6.00 g
2	N-9	6.80 efg	11	N-14	5.40 h
3	N-3	10.20 b	12	N-4	8.00 d
4	Azkan	8.80 c	13	N-11	6.80 efg
5	N-10	7.00 ef	14	N-12	6.60 f
6	N-5	8.80 c	15	N-1	14.40 a
7	N-15	5.40 h	16	Uzunlu-99	5.40 h
8	N-7	7.80 de	17	N-2	9.80 bc
9	Aksu	6.40 fg	18	N-6	7.00 ef
Minimum - Maximum		5.40-14.40			
Genotip Ortalaması		7.81			
Çeşit Ortalaması		6.86			
Genel Ortalama		7.65			
Önemlilik		**			
CV (%)		10.59			

3.5. Yüz Tane Ağırlığı (g)

Saf hat seleksiyon yöntemi ile seçilen 15 adet nohut genotipi ile 3 adet standart nohut çeşidi olmak üzere toplam 18 adet nohut genotip/çeşidin ortalama yüz tane ağırlığı değerleri Tablo 9’da verilmiştir. Varyans analiz sonucunda incelenen özelliklerden olan yüz tane ağırlığı bakımından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiştir. Çalışmada yer alan standart nohut çeşitleri bakımından Tablo yorumlandığında bloklar ortalaması olarak en yüksek yüz tane ağırlığı 43.52 g ile Uzunlu 99 nohut çeşidinden elde edildiği ortaya konulmuş olup bu çeşidi 41.56 g ile Aksu nohut çeşidi izlemiştir. En düşük yüz tane ağırlığı ise 37.16 g ile Azkan nohut çeşidinde görülmüş olup standart nohut çeşitlerinin ortalama yüz tane ağırlık değerinin 40.75 g olduğu tespit edilmiştir. Yürütülen çalışmada yer alan 15 adet nohut genotipi yorumlandığında ise en yüksek yüz tane ağırlığı N-8 nolu genotipte 42.83 g ile tespit edilirken bunu N-14 nolu genotipi 42.78 g ile izlemiş olup “bc” istatistik grubunda yer almıştır. N-13 nolu genotip ise 33.61 g yüz tane ağırlığı değeri ile tüm nohut genotipleri içerisinde son sırada kendine yer bulmuş olup nohut genotiplerinin ortalama yüz tane ağırlığı değerinin ise 38.02 g olduğu görülmüştür. Ortalama bu değer, standart nohut çeşitleri (40.75 g) ile çeşit ve yerel nohut genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 38.47 g yüz tane ağırlığı değerinin altında yer aldığı ortaya konulmuştur.

Tablo 9. Denemede yer alan nohut genotip/çeşitlere ait yüz tane ağırlığı (g) değerleri ve istatistik gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	YTA	Sıra No	Genotip/Çeşitler	YTA
1	N-13	33.61 <i>ijk</i>	10	N-8	42.83 <i>b</i>
2	N-9	37.35 <i>gh</i>	11	N-14	42.78 <i>bc</i>
3	N-3	39.12 <i>f</i>	12	N-4	39.00 <i>fg</i>
4	Azkan	37.16 <i>gh₁</i>	13	N-11	37.06 <i>gh₁</i>
5	N-10	36.00 <i>h₁</i>	14	N-12	37.42 <i>g</i>
6	N-5	33.75 <i>ij</i>	15	N-1	36.46 <i>h</i>
7	N-15	40.87 <i>e</i>	16	Uzunlu-99	43.52 <i>a</i>
8	N-7	34.23 <i>i</i>	17	N-2	40.92 <i>d</i>
9	Aksu	41.56 <i>c</i>	18	N-6	28.86 <i>fgh</i>
Minimum - Maximum		33.61-43.52			
Genotip Ortalaması		38.02			
Çeşit Ortalaması		40.75			
Genel Ortalama		38.47			
Önemlilik		**			
CV (%)		4.11			

Bu agronomik parametre üzerinde yürütülen diğer çalışmalarda Karasu ve ark. (1999) Isparta ekolojik koşullarında 31.16-52.26 g, Altınbaş ve Sepetoğlu (2001) Bornova ekolojik koşullarında 40.10-44.50 g, Türk ve Koç (2003) Diyarbakır ekolojik koşullarında 32.43-45.50 g, Kaçar ve ark. (2005) Bursa ekolojik koşullarında 31.88-47.36 g, Mart ve ark. (2005) Çukurova ekolojik koşullarında 32.93-36.19 g, Öztaş (2006) Harran Ovası ekolojik koşullarında 29.00-45.33 g, Karaköy (2008) Çukurova ekolojik koşullarında 37.60-51.50 g, Bıçaksız (2010) Eskişehir ekolojik koşullarında 40.40-44.03 g, Yaşar (2010) Güneydoğu Anadolu Bölgesi ekolojik koşullarında 29.87-39.90 g, Bakoğlu (2011) Bingöl ekolojik koşullarında 22.88-31.77 g, Uzun ve ark. (2012) Amasya ekolojik koşullarında 43.35-55.67 g, Bayrak ve Keleş (2015) Konya ekolojik koşullarında 35.20-47.00 g, Bıçak ve ark. (2017) Diyarbakır ekolojik koşullarında 39.50-53.70 g, Gürbüz (2018) Bingöl ekolojik koşullarında 31.50-37.10 g, Altınkaynak (2019) Muğla ekolojik koşullarında 33.50-37.20 g, Aydoğan (2019) Eskişehir ekolojik koşullarında 24.60-42.70 g, Çolak (2019) Kahramanmaraş ekolojik koşullarında 43.13-43.56 g, Ertem (2019) Diyarbakır ekolojik koşullarında 35.54-50.20 g, Demirci ve Bildirici (2020) Şanlıurfa ekolojik koşullarında 29.50-39.80 g, Güngör ve ark. (2021) Kırklareli ve Edirne ekolojik koşullarında 34.40-53.70 g, Güneş ve ark. (2022) Kahramanmaraş ekolojik koşullarında 39.96-50.70 g ve Özcan ve Yücel (2022) İdil/Şırnak ekolojik koşullarında 27.70-42.30 g değerlerini ortaya koymuşlardır. Yürütülen araştırmada yüz tane ağırlığına ait elde edilmiş olan bu değerler (33.61-43.52), bu agronomik parametre üzerine çalışmalar yürütülen araştırmacılara ait değerler aralığında (22.88-55.67 g) yer almakta olup yürütülen çalışma ile paralellik göstermektedir.

3.6. Biyolojik Verim (g)

15 adedi nohut genotipi, 3 adedi standart nohut çeşidi olmak üzere toplam 18 adet nohut genotip/çeşidin ortalama biyolojik verim değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Varyans analiz sonucunda incelenen özelliklerden olan biyolojik verim açısından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiştir.

Tablo 10. Denemede yer alan nohut genotip/çeşitlere ait biyolojik verim (g) değerleri ve istatistik gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BV	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BV
1	N-13	4.61 g	10	N-8	5.10 efg
2	N-9	5.01 f	11	N-14	4.34 gh
3	N-3	7.40 b	12	N-4	5.92 d
4	Azkan	6.73 c	13	N-11	4.68 fgh
5	N-10	7.37 b	14	N-12	4.60 g
6	N-5	5.79 de	15	N-1	10.38 a
7	N-15	5.44 e	16	Uzunlu-99	5.56 def
8	N-7	5.56 def	17	N-2	7.15 bc
9	Aksu	4.84 fg	18	N-6	5.24 ef
Minimum - Maximum		4.34-10.38			
Genotip Ortalaması		5.91			
Çeşit Ortalaması		5.71			
Genel Ortalama		5.87			
Önemlilik		**			
CV (%)		12.61			

Çalışmada yer alan standart nohut çeşitleri bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek biyolojik verim 6.73 g ile Azkan nohut çeşidinden elde edildiği görülmüş olup bu standart çeşidi 5.56 g ile Uzunlu 99 standart nohut çeşidi izlemiştir. En düşük biyolojik verim değeri ise 4.84 g ile Aksu nohut çeşidinde tespit edilmiş olup standart nohut çeşitlerinin ortalama biyolojik verim değerinin 5.71 g olduğu ortaya konulmuştur. Yürütülen araştırmada yer alan 15 adet nohut genotipi değerlendirildiğinde ise en yüksek biyolojik verim bir çok özelliğe olduğu gibi N-1 nolu genotipte 10.38 g olarak tespit edilirken bu nohut genotipini N-3 nolu genotipi 7.40 g ile izlemiş olup “b” istatistik grubunda yer almıştır. N-14 nolu genotip ise 4.34 g biyolojik verim değeri ile tüm nohut genotipleri içerisinde son sırada olduğu belirlenmiş olup tüm nohut genotiplerinin ortalama biyolojik verim değerinin 5.91 g olduğu ortaya konulmuştur. Bu agronomik parametre üzerine yürütülen diğer çalışmalarda ise Singh ve ark. (1990) ICARDA şartlarında 110-1680 g/parsel, Kulaz ve Çiftçi (1999) Van ekolojik koşullarında 33.3-39.5 g, Soylu (1999) Ankara ekolojik koşullarında 13.33-17.99 g, Altınbaş ve Sepetoğlu (2001) Bornova ekolojik koşullarında 29.8-40.8 g, Arshad ve ark. (2002) Pakistan ekolojik koşullarında 16.98-37.5 g, Çiftçi ve ark. (2004) Van ekolojik koşullarında 146.7-226.6 kg/da, Kayan (2005) Orta Anadolu ekolojik koşullarında 8.02-12.97 g, Öztaş (2006) Harran ekolojik koşullarında 284.95-503.20 kg/da, Bakoğlu (2009) Elazığ ekolojik koşullarında 158.90-223 kg/da, Cancı ve Toker (2009) Antalya ekolojik koşullarında 14.0 kg/da, Bıçaksız (2010) Eskişehir ekolojik koşullarında 194.67-301.87 g/m², Beysarı (2012) Bingöl ekolojik koşullarında 176.9-214.1 kg/da, Dinç (2014) Van ekolojik koşullarında 171.96-313.33 kg/da, Patan (2014) Erzurum ekolojik koşullarında 176.0-516.8 kg/da, Sarımurat (2018) Van ekolojik koşullarında 319.30-466.06 kg/da, Gürbüz (2018) Bingöl ekolojik koşullarında 110.4-168.5 kg/da, Yiğit (2018) Kırşehir ekolojik koşullarında 13.07-16.61 g, Aldemir (2019) Afyonkarahisar ekolojik koşullarında 20.87-42.50 g, Çakmak (2019) Şanlıurfa ekolojik koşullarında 64-245 g, Tetik (2019) Bolu ekolojik koşullarında 236.1-587 kg/da, Uçar (2020) Siirt ekolojik koşullarında 201-584.9 kg/da, Üyetürk (2020) Fethiye ekolojik koşullarında 499-514,1 kg/da, Oğuz ve Erman (2021) Siirt ekolojik koşullarında 169.0-477.6 kg/da, Özçelik (2021) Diyarbakır ekolojik koşullarında 541.25-616.33 kg/da ve Yücedağ (2021) Bozova/Şanlıurfa ekolojik koşullarında 487.1-767.4 kg/da arasında değerler elde etmişlerdir. Yürütülen araştırmada biyolojik verime ait elde edilmiş olan bu değerlerin (4.34-10.38 g), bu agronomik parametre üzerine çalışmalar yürüten araştırmacılar tarafından elde edilen değerlerin aralığında (8.02-245.00 g) yer almakta olup yürütülen çalışma ile paralellik gösterdiği ancak yukarıda verilmiş çalışmaların bazılarında biyolojik verime ait değerler yürütmüş olduğumuz çalışmamızdan daha fazla olarak gerçekleşirken bazı çalışmalarda ise biyolojik verim değerleri daha az elde edilmiştir. Elde edilen bu farklı değerlerin yürütülen çalışmalarda yer alan genotip/çeşitlerin genetik kabiliyetlerinin yanında ekolojik ve iklimsel farklılıklar, kışlık ve

yazlık ekimler ile kültürel uygulamaların farklı şekillerde kullanılmasından kaynaklanmış olabileceği ön görülmektedir.

3.7. Hasat İndeksi (%)

Saf hat seleksiyon yöntemi ile seçilen 15 adet nohut genotipi ile 3 adet standart nohut çeşidi olmak üzere toplam 18 adet nohut genotip/çeşidinin ortalama hasat indeksi değerleri Tablo 11’de verilmiştir. Varyans analiz sonucunda incelenen özelliklerden olan hasat indeksi bakımından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu saptanmıştır.

Tablo 11. Denemede yer alan nohut genotip/çeşitlere ait hasat indeksi (%) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	Hİ	Sıra No	Genotip/Çeşitler	Hİ
1	N-13	52.49 cd	10	N-8	50.39 def
2	N-9	50.70 d	11	N-14	53.23 b-e
3	N-3	53.92 bc	12	N-4	52.70 c
4	Azkan	48.59 e	13	N-11	53.85 bc
5	N-10	34.19 g	14	N-12	53.70 bcd
6	N-5	51.30 c-f	15	N-1	50.58 de
7	N-15	42.10 f	16	Uzunlu-99	42.27 f
8	N-7	48.02 ef	17	N-2	56.08 a
9	Aksu	54.96 b	18	N-6	51.91 cde
Minimum - Maximum		34.19-56.08			
Genotip Ortalaması		50.34			
Çeşit Ortalaması		48.60			
Genel Ortalama		50.05			
Önemlilik		**			
CV (%)		5.03			

Çalışmada yer alan standart nohut çeşitleri açısından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek hasat indeksinin %54.96 ile Aksu çeşidinden elde edildiği ortaya konulmuş olup bu standart nohut çeşidini %48.59 ile Azkan nohut çeşidi izlemiştir. En düşük hasat indeksi değeri ise %42.27 ile Uzunlu 99 nohut çeşidinde görülmüş olup “f” istatistiki grubunda yer almıştır. Standart nohut çeşitlerinin ortalama hasat indeksi değerinin ise %48.60 olduğu belirlenmiştir. Yürütülen araştırmada yer alan 15 adet nohut genotipi kendi içerisinde değerlendirildiğinde en yüksek hasat indeksi N-2 nolu genotipte %56.08 olarak tespit edilirken bu nohut genotipini N-3 nolu genotip %53.92 hasat indeksi değeri ile izlemiş olup “bc” istatistiki grubunda yer almıştır. N-10 nolu genotip ise %34.19 hasat indeksi değeri ile tüm nohut genotipleri içerisinde son sırada yer almış olup nohut genotiplerinin ortalama hasat indeksi değerinin %50.34 olarak belirlendiği ortaya konulmuştur. Hasat indeksi adına ortalama bu değer, standart nohut çeşitleri (%48.60) ile çeşit ve nohut genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan %50.05 hasat indeksi değerinden fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu agronomik parametre üzerine yürütülen diğer çalışmalarda ise Erman ve ark. (1997) Van ekolojik koşullarında %31.10-64.10, Soylu (1999) Ankara ekolojik koşullarında % 45.08-49.85, Arshad ve ark. (2002) Islamabad/Pakistan ekolojik koşullarında %47.60-59.30, Öztaş (2006) Harran Ovası ekolojik koşullarında %46.00-53.00, Yeşilgün (2006) Çukurova ekolojik koşullarında %27.70-41.06, Hajzadeh (2008) Ankara ekolojik koşullarında % 40.40-42.91, Bıçaksız (2010) Eskişehir ekolojik koşullarında %39.67-45.82, Erdin (2013) Van ekolojik koşullarında %33.77-37.50, Doğan (2014) Mardin ekolojik koşullarında % 16.90-27.00, Erden (2014) Tillo/Siirt ekolojik koşullarında %37.40-44.50, Patan (2014) Erzurum ekolojik koşullarında %26.40-50.70, Gürbüz (2018) Bingöl ekolojik koşullarında %20.50-45.20, Beykara (2019) Bingöl ekolojik koşullarında %23.16-39.61, Çakmak (2019) Şanlıurfa ekolojik koşullarında %16.67-49.92, Tetik (2019) Bolu ekolojik koşullarında %12.60-33.30, Türk ve Polat (2019) Diyarbakır ekolojik koşullarında %47.48-49.75, Uçar (2020) Siirt ekolojik koşullarında 41.30-43.70, Üyetürk (2020) Fethiye/Muğla ekolojik koşullarında 34.50-36.40, Demir (2021) Diyarbakır ekolojik koşullarında %38.90-39.50, Özcan (2021) İdil/Şırnak ekolojik koşullarında %33.90-42.10 ve Yücedağ (2021)

Bozova/Şanlıurfa ekolojik koşullarında %38.30-45.60 değerlerini elde etmişlerdir. Yürütülen araştırmada hasat indeksine ait elde edilmiş olan bu değerler (%34.19-56.08), bu parametre üzerine çalışmalar yürüten araştırmacılara ait elde edilmiş olan değerler aralığında (%12.60-64.10) yer almakta olup yürütülen çalışma ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir.

3.8. Bitkide Tane Verimi (g)

Dekara tane verimini etkileyen verim parametrelerinden bir tanesi olan bitki başına tane verimi, nohut yetiştiriciliğinde toplam üretim miktarının belirlenmesinde önemli göstergelerdendir. Çeşit/çeşitler geliştirmek amacıyla yürütülen ıslah çalışmaları kapsamında göz önüne alınan verim unsurlarının başında gelen bitki başına tane verimi, diğer dekara tane verimini etkileyen verim unsurları ile pozitif ve çok önemli ilişkiler göstermesinin yanında dekara tane veriminin hesaplanmasında da yol gösterici bir parametre olarak görülmektedir. Bu kapsamda çalışmada yer alan 15 adet nohut genotipi ile 3 adet standart nohut çeşidi olmak üzere toplam 18 adet nohut genotip/çeşidinin ortalama bitki başına tane verimi değerleri Tablo 12’de verilmiştir. Varyans analiz sonucunda incelenen özelliklerden olan bitki başına tane verimi bakımından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu tespit edilmiştir.

Tablo 12. Denemede yer alan nohut genotip/çeşitlere ait bitkide tane verimi (g) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/ Çeşitler	BTV	Sıra No	Genotip/ Çeşitler	BTV
1	N-13	5.25 a	10	N-8	2.57 efg
2	N-9	4.01 b	11	N-14	2.54 f
3	N-3	3.99 b	12	N-4	2.52 f
4	Azkan	3.27 c	13	N-11	2.52 f
5	N-10	3.12 cd	14	N-12	2.47 fg
6	N-5	2.97 d	15	N-1	2.42 fgh
7	N-15	2.72 e	16	Uzunlu-99	2.35 g
8	N-7	2.67 ef	17	N-2	2.31 g
9	Aksu	2.66 ef	18	N-6	2.29 gh
Minimum - Maximum		2.29-5.25			
Genotip Ortalaması		2.96			
Çeşit Ortalaması		2.76			
Genel Ortalama		2.93			
Önemlilik		**			
CV (%)		9.47			

Yürütülen çalışmada yer alan standart nohut çeşitleri açısından Tablo incelendiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bitki başına tane verimi 3.27 g ile Azkan nohut çeşidinden elde edildiği görülmüş olup bu standart nohut çeşidini 2.66 g ile Aksu nohut çeşidi “ef” istatistiki grubu ile izlemiştir. Uzunlu 99 nohut çeşidi ise 2.35 g bitki başına tane verimi değeri ile tüm çeşitler içerisinde son sırada yer almış olup standart nohut çeşitlerinin ortalama bitki başına tane verimi değerinin 2.76 g olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada yer alan 15 adet nohut genotipi değerlendirildiğinde en yüksek bitki başına tane verimi N-13 nolu genotipte 5.25 g olarak tespit edilirken bu nohut genotipini N-9 nolu genotipi 4.01 g ile izlemiş olup “b” istatistiki grubunda yer aldığı görülmüştür. Buna karşın tüm nohut genotipleri içerisinde N-6 nolu genotip almış olduğu 2.29 g bitki başına tane verim değeri ile tüm genotipler içerisinde son sırada kendine yer bulmuş olup nohut genotiplerinin ortalama bitki başına tane verimi değerinin 2.96 g olduğu ortaya konulmuştur. Bitki başına tane verimi adına ortalama bu değer, standart nohut çeşitleri (2.76 g/bitki) ile çeşit ve nohut genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 2.93 g/tane bitki başına tane verimi değerinden yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu agronomik parametre üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Soylu (1999) Ankara ekolojik koşullarında 6.01-8.80 g, Altınbaş ve Sepetoğlu (2001) Bornova/İzmir ekolojik koşullarında 11.10-13.90 g, Yeşilgün (2006) Çukurova

ekolojik koşullarında 20.87-47 g, Hajzadeh (2008) Ankara ekolojik koşullarında 2.86-4.03 g, Karaköy (2008) Çukurova ekolojik koşullarında 6.60-16.10 g, Bıçaksız (2010) Eskişehir ekolojik koşullarında 6.17-7.84 g, Karakan Kaya (2014) Elazığ ekolojik koşullarında 4.70-11.00 g, Atmaca ve ark. (2015) Eskişehir, Kütahya ve Uşak ekolojik koşullarında 2.90-7.00 g, Varol (2018) Kayseri ekolojik koşullarında 5.84-9.82 g, Beykara (2019) Bingöl ekolojik koşullarında 4.26-14.93 g, Demircioğlu ve Yağmur (2020) Kırşehir ekolojik koşullarında 3.63-9.54 g, Karadavut ve Sözen (2020b) Kırşehir ekolojik koşullarında 4.20-9.10 g ve Özçelik (2021) Diyarbakır ekolojik koşullarında 9.10-11.31 g değerlerini elde etmişlerdir. Yürütülen araştırmamızda elde edilen değerlerin (2.29-5.25 g/bitki), yukarıda verilen araştırmacılara ait elde edilen değerler (2.86-16.1 g/bitki) aralığında yer almakta olup çalışmamızla yürütülen çalışmalar bu agronomik parametre üzerine paralellik göstermektedir.

4. SONUÇ

Sivas ekolojik koşullarında bazı nohut genotip/çeşitlerinin değişen iklim koşulları altında verim ve verim öğelerinin performanslarının ortaya konulması amacıyla yürütülen çalışma sonuçlarına göre N-13, N-9, N-3 ve Azkan nohut genotip/çeşitlerin Sivas ekolojik koşulları için uygun genotip/çeşit oldukları ancak bu tür iklimsel çalışmalarda elde edilecek sonuçlarla daha güvenilir önerilerde bulunulabilmesi için araştırmamızın bölge ekolojik koşullarında en az 2 yıl daha tekrarlanmasının daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

Sonuç olarak ülkemizde nohutta çeşit sayısının az ve genetik tabanın dar olması nedeniyle ve özellikle abiyotik faktörlere karşı yürütülecek ıslah çalışmalarında seleksiyonları gerçekleştirilen bu genotiplerden ümitvar olanların yapacağımız çalışmalara kaynak teşkil edecek düzeyde bulunduğu kanısındayız.

KAYNAKÇA

- Aldemir, B., 2019. *Nohut (Cicer arietinum L.) Tarımında Gül Posası, Ahır Gübresi ve Aşılamanın Verim ve Bazı Verim Öğelerine Etkileri*. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Altınbaş, M., Sepetoğlu, H., 2001. Yeni geliştirilen nohut hatlarının Bornova koşullarında verim ve bazı tarımsal özellikleri üzerinde araştırmalar. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38 (2-3), 39-46 s.
- Aldemir, B., 2019. *Nohut (Cicer arietinum L.) Tarımında Gül Posası, Ahır Gübresi ve Aşılamanın Verim ve Bazı Verim Öğelerine Etkileri*. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 63 s.
- Altınbaş, M., Sepetoğlu, H., 2001. Yeni Geliştirilen Nohut Hatlarının Bornova Koşullarında Verim ve Bazı Tarımsal Özellikleri Üzerinde Araştırmalar. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38 (2-3): 39-46 s.
- Altınkaynak, C., 2019. Fethiye Koşullarında Bakteri Aşılamanın, Organik ve İnorganik Gübrelemenin Nohutta (*Cicer arietinum L.*) Verim, Kalite ve Çevre Üzerine Etkisi. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Muğla, 64 s.
- Arshad, M., Bakhsh, A., Bashir, M., Haqqani, A.M., 2002. Determining the Heritability and Relationship Between Yield and Yield Components in Chickpea (*Cicer arietinum L.*). *Pakistan Journal of Botany*, 34 (3): 237-245 p.
- Aydoğan, Y., 2019. Eskişehir Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum L.*) Çeşitlerinin Tarımsal Özelliklerinin ve Özellikler Arası İlişkilerin Belirlenmesi. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir, 74 s.
- Babagil, G.E., 2010. Muş Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum L.*) Çeşitlerinin Verim ve Verim Unsurlarının Değerlendirilmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 7 (3): 181-186 s.
- Babagil, G.E., 2011. Erzurum Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum L.*) Çeşitlerinin Verim ve Verim Özellikleri İncelenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 26 (2): 122-127 s.
- Bakoğlu, A., 2009. Elazığ Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut Çeşitlerinin Verim ve Verim Öğeleri Üzerine Araştırma. *Harran Üniversitesi Ziraat Fak. Dergisi*, 13 (1): 1-6 s.

- Bakoğlu, A., 2011. Bingöl Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Hat ve Çeşitlerinde Tohum Verimi ve Bazı Tarımsal Özelliklerin Belirlenmesi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1 (2): 1-6 s.
- Bakoğlu, A., Ayçiçek, M., 2005. Bingöl Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Verim ve Verim Öğeleri Üzerine Bir Araştırma. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17 (1): 107-113 s.
- Bayrak, H., Keleş, R., 2015. İleri Çıkmış Nohut Islah Hatları ve Çeşitlerin Konya Ekolojik Koşullarında Bazı Verim ve Verim Unsurları ile İlgili Özelliklerin Belirlenmesi. XI. Tarla Bitkileri Kongresi, 7-10 Eylül, Çanakkale, 356-359 s.
- Bayrak, H., Önder, M., 2017. Konya Ekolojisinde Tarımı Yapılan Yerel Nohut Popülasyonları ve Çeşitlerinin (*Cicer arietinum* L.) Tarımsal, Teknolojik ve Besinsel Karakterlerinin Belirlenmesi. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 26 (Özel Sayı): 52-61 s.
- Beykara, İ., 2019. Bingöl Ekolojik Koşullarında Farklı Ekim Zamanlarının Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Genotiplerinde Verim ve Verim Özelliklerine Etkisi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bingöl, 84.
- Beysarı, V., 2012. Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Bingöl koşullarındaki Verim ve Adaptasyon Yeteneklerinin Belirlenmesi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bingöl, 49 s.
- Bıçaksız, Y., 2010. Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Orta Anadolu Koşullarına Adaptasyonu. Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 73 s.
- Biçer, B.T., 2001. Diyarbakır Yöresinde Toplanan Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Yerel Çeşitlerinde Önemli Bitkisel ve Tarımsal Özelliklerin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Doktora Tezi, Adana, 130 s.
- Biçer, B.T., Anlarsal, A.E., 2005. Diyarbakır Yöresi Nohut (*Cicer arietinum* L.) Köy Popülasyonlarının Tarımsal, Morfolojik ve Fenolojik Özellikler İçin Değerlendirilmesi. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 9 (3): 1-8 s.
- Biçer, B.T., Şakar, D., 2011. Yabancı ve Yerli Nohutların Bitkisel ve Tane Kimyasal Özellikleri. IX. Türkiye Tarla Bitkileri Kongresi, Bursa, 1: 766-769 s.
- Biçer, B.T., Akıncı, C., Eker, S., 2017a. Kışlık Nohut Genotiplerinin Soğuk ve Antraknoza Dayanıklılığı ile Tohum Pişme Hususiyetlerinin Saptanması. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 4 (3): 355-364 s.
- Canacı, H., Toker, C., 2009. Evaluation of Yield Criteria for Drought and Heat Resistance in Chickpea (*Cicer arietinum* L.). Journal of Agronomy & Crop Science, 195: 47-54 p.
- Ceran, F., 2015. Farklı Zamanlarda Ekilen Nohut Çeşitlerinin (*Cicer arietinum* L.) Bazı Tarımsal Özelliklerinin Belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Konya, 58 s.
- Cinsoy, A.S., Açıkgöz, N., Yaman, M., Kıtık, A., 1997. Ege Bölgesinden Toplanan Nohut (*Cicer arietinum* L.) Genetik Kaynakları Materyalinin Karakterizasyonu: Kantitatif Karakterler. Anadolu Journal of AARI, 7 (1): 43-59 s.
- Çakmak, A., 2019. Adıyaman, Diyarbakır ve Şanlıurfa İllerinde Toplanan Yabancı Nohut Türlerinin Karakterizasyonu. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa, 78 s.
- Çerikci, M.Ç., 2017. Kahramanmaraş Koşullarına Uygun Kışlık Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Belirlenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 55 s.
- Çiftçi, V., Doğan, Y., Togay, N., Karakuş, M., 2004. Türkiye’de Tescil Edilmiş Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Van Ekolojik Koşullarında Verim ve Bazı Verim Öğelerinin Belirlenmesi. Ç.Ü.Z.F. Dergisi, 19 (2): 105-110 s.
- Çolak, M.F., 2019. Kahramanmaraş Koşullarında Farklı Oranlarda ve Dönemlerde Uygulanan Bitki Büyüme Düzenleyicisinin Nohutta Verim ve Önemli Tarımsal Özellikler Üzerine Etkisinin Belirlenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 64 s.

- Demir, E., 2021. Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Nohut (*Cicer arietinum* L.)’ta Kimyasal ve Organik Gübrelemenin Verim ve Verim Özelliklerine Etkisi. Mardin Artuklu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Mardin.
- Demirci, Ö., Bildirici, N., 2020. Şanlıurfa Ekolojik Koşullarında Yetiştirilen Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Verim ve Verim Unsurlarının Belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 20: 656-662 s.
- Demircioğlu, K., Yağmur, M., 2020. Farklı Gama Işını Dozları Uygulanmış Bazı Nohut Çeşitlerinin M2 Generasyonunda Morfo-Agronomik Özelliklerinin Belirlenmesi. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 24 (4): 447-457 s.
- Dinç, A., 2014. Türkiye’de Tescil Edilmiş Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Van Koşullarında Verim ve Verim Öğelerinin Belirlenmesi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Van, 63 s.
- Doğan, Y., (2014. Mardin Kızıltepe Ekolojik Koşullarında Kışlık Olarak Yetiştirilebilecek Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Belirlenmesi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 31 (1): 37-46 s.
- Doğan, Y., Çiftçi, V., 2019. Van Ekolojik Koşullarında Farklı Bitki Sıklıkları ve Ekim Şekillerinin Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinde Verim ve Bazı Verim Öğelerine Etkisi. Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi, 8 (1): 91-105 s.
- Erden, Z., 2014. Siirt Ekolojik Koşullarında Nohudun (*Cicer arietinum* L.) Çeşit ve Adaptasyon Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Van.
- Erdin, F., 2013. Van–Gevaş Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin İkinci Ürün Olarak Yetiştirilmesi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Van, 46 s.
- Erman, M., Çiftçi, V., Geçit, H.H., 1997. Nohut (*Cicer arietinum* L.)’ta Özellikler Arası İlişkiler ve Path Katsayısı Analizi Üzerine Bir Araştırma, Tarım Bilimleri Dergisi, 3 (3): 43-46 s.
- Ertem, T., 2019. Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Genotiplerinin Adaptasyon Özelliklerinin Belirlenmesi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır, 47 s.
- Fiaz, S., Aslam, M., Wattoo, F.M., Riaz, A., Bashir, I., 2016. Interrelationships Among Yield and Yield Contributing Traits in Chickpea (*Cicer arietinum* L.). International Journal of Biosciences, 9 (2): 49-57 p.
- Güler, M., 2009. Ethephon Dozları ve Uygulama Zamanlarının Nohut (*Cicer arietinum* L.)’ta Verim ve Verim Öğelerine Etkileri. Tarım Bilimleri Dergisi, 15 (4): 301-309 s.
- Gündoğdu Gürbüz, L., 2018. Bingöl Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bingöl, 53 s.
- Güneş, M., 2016. Kahramanmaraş Koşullarında Bazı Yemelik Baklagil (Bakla, Mercimek, Nohut, Bezelye) Çeşitlerinin Verim ve Verim Unsurlarının Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 69 s.
- Güneş, A., Tekatlı, M., Ertürk, E., Kılınç, C., 2022. Kahramanmaraş Koşullarında Bazı İleri Nohut (*Cicer arietinum* L.) Genotiplerinde Tarımsal Özelliklerin İncelenmesi. Doğu Akdeniz Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 9 (1), 119-131 s.
- Güngör, H., Çakır, M.F., Dumlupınar, Z., 2021. Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Genotiplerinin Kırklareli ve Edirne Koşullarında Verim ve Verim Unsurları Bakımından Değerlendirilmesi. Ziraat Mühendisliği Dergisi, 373, 10-18 s.
- Gürbak, D., 2019. Nohutta Verim ve Verim Unsurları Yönünden Genetik Değişimin İncelenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 51 s.
- Gürbüz, L.G., 2018. Bingöl Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bingöl, 64 s.

- Kaçar, O., Göksu, E., Azkan, N., 2005. Bursa’da Kışlık Olarak Yetiştirilebilecek Nohut (*Cicer arietinum* L.) Hatlarının Belirlenmesi. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 19 (2): 33-45 s.
- Karadavut, U., Sözen, Ö., 2020a. Farklı Ekim Zamanlarında Yetiştirilen Nohut Bitkilerinin (*Cicer arietinum* L.) Bazı Agronomik ve Fizyolojik Özelliklerinin Belirlenmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 7 (4): 904-912 s.
- Karadavut U., Sözen, Ö., 2020b. Multivariable Analysis of Characters Affecting Yield in Chickpea Plants, J. Glob. Innov. Agric. Soc. Sci., 8 (3): 155-160 p.
- Karakan Kaya, F., 2014. Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Elazığ Koşullarındaki Verim ve Adaptasyon Yeteneklerinin Belirlenmesi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bingöl, 60 s.
- Karaköy, T., 2008. Çukurova ve Orta Anadolu Bölgelerinden Toplanan Bazı Yerel Nohut Üzerine Bir Araştırma. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Doktora Tezi, Adana, 105 s.
- Karaköy, T., 2011. Kışlık Yetiştirilen Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Hat ve Çeşitlerinin Çukurova Ekolojik Koşullarında Verim ve Verim Komponentleri Açısından Değerlendirilmesi. Bursa IX. Türkiye Tarla Bitkileri Kongresi, 1: 619-624 s.
- Karaköy, T., Sözen, Ö., 2022. Nohut Çeşitlerinde Verim ve Verim Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Sivas International Conference on Scientific and Innovation Research, 13-15 Ekim, 339-351 s.
- Karasu, A., Karadoğan, T., Çarkçı, K., Türk, M., 1999. Isparta Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Hat ve Çeşitlerin Adaptasyonu Üzerinde Bir Araştırma. Türkiye III. Tarla Bitkileri Kongresi, Adana.
- Kayan, N., 2005. Orta Anadolu Koşullarında Farklı Toprak İşleme Yöntemleri, Yabancı Ot Kontrolü ve Fosforlu Gübre Dozlarının Nohutta Verim ve Verim Ögelerine Etkileri. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara, 118 s.
- Kıbık, G., 2022. Yeni Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Kayseri Koşullarında Agro-Morfolojik Özelliklerinin Belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 31 s.
- Kulaz, H., 1991. Van Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut Çeşitlerinin Verim ve Adaptasyonu Üzerine Araştırmalar. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Van, 70 s.
- Kulaz, H., Çiftçi, V., 1999. Van Koşullarında Bitki Sıklığının Nohutta (*Cicer arietinum* L.) Verim ve Verim Ögelerine Etkisi. Turkish Journal of Agriculture And Forestry, (23): 599-601 s.
- Mart, D., Yücel, D., Türkeri, M., 2005. Çukurova Koşullarında Nohut (*Cicer arietinum* L.) Hat ve Çeşitlerinin Verim ve Verim Ögeleri ve Kalite Değerleri. KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, 20 (1): 371-374 s.
- Oğuz, A., 2018. Siirt Ekolojik Koşullarında Farklı Ekim Zamanlarının Bazı Nohut Çeşitlerinde Verim, Verim Ögeleri ve Nodülasyon Etkisi. Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Siirt, 78 s.
- Oğuz, A., Erman, M., 2021. Siirt Ekolojik Koşullarında Farklı Ekim Zamanlarında Ekilen Nohut Çeşitlerinin Verim, Verim Ögeleri ve Nodülasyon Üzerine Etkisi. MAS Journal of Applied Sciences, 6 (3), 564-575 s.
- Özcan, M.A., 2021. Şırnak-İdil Koşullarında Yetiştirilebilecek Kışlık Nohut Genotiplerinin Saptanması. Şırnak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Şırnak, 59 s.
- Özcan, M.A., Yücel, D., 2022. Şırnak/İdil Koşullarında Yetiştirilebilecek Kışlık Nohut Genotiplerinin Saptanması. ISPEC Journal of Agricultural Sciences, 6 (1): 99-109 s.
- Özçelik, A.J., 2021. Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Farklı Ekim Sıklıklarının Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinde Verim ve Verim ile İlgili Özelliklere Etkisi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana, 73 s.
- Öztaş, E.E., 2006. Farklı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Harran Ovası Koşullarında Kışa Dayanıklılık, Verim ve Verim Özelliklerinin Belirlenmesi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi. Şanlıurfa, 58.

- Öztaş, E., Bucak, B., Al, V., Kahraman, A., 2007. Farklı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Harran Ovası Koşullarında Kışa Dayanıklılık, Verim ve Diğer Özelliklerinin Belirlenmesi. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 11 (314): 81-85 s.
- Patan, F., 2014. Tescilli Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Erzurum Ekolojik Koşullarına Adaptasyonu. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, 59 s.
- Sarımurat, M.Ş., 2018. Van Ekolojik Koşullarında Yetiştirilen Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Van, 72 s.
- Sarımurat, M.Ş., Kulaz, H., Erdin, F., 2022. Van Ekolojik Koşullarında Yetiştirilebilen Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinde Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. MAS J. of Applied Sci., 7(1): 128-138 s.
- Sayılğan, Ç., Kara, B., Kocatürk, M., Pamukcu, M., Akın, F., Aydoğdu, M., 2022. Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çıkış Gün Sayısı Üzerine Etkili Bazı Faktörler ve Bu Faktörler ile Çıkış Gün Sayısı Arasındaki İlişkiler. Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi, 4 (2): 76-81.
- Singh, K.B., 1987. *Chickpea breeding*. In: M.C. Saxena & K.B. Singh (Eds.), The Chickpea, pp. 127-162. CAB International, Wallingford, UK.
- Singh, K.B., Bejiga, G., Malhotra, R.S., 1990. Associations of Some Characters with Seed Yield in Chickpea Collections. Euphytica, 49 (1): 83-88 s.
- Soylu, Ç., 1999. Nohutta (*Cicer arietinum* L.) Bakteri Aşılama ve Gübrelemenin Bazı Bitki Özelliklerine ve Verime Olan Etkileri. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 55 s.
- Soysal, S., 2020. Siirt Ekolojik Koşullarında Mikrobiyolojik ve İnorganik Gübrelemenin Nohudun (*Cicer arietinum* L.) Verim, Verim Öğeleri ve Nodülasyonu Üzerine Etkileri. Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Siirt, 134 s.
- Sözen, Ö., Karadavut, U., 2018. Yerel Nohut Genotiplerinde Erken Generasyon Döneminde Tane Verimi ve Verim Komponentleri İçin Seleksiyon Üzerine Bir Araştırma. Uluslararası Katılımlı Türkiye VI. Tohumculuk Kongresi, 10-13 Eylül, Niğde.
- Sözen, Ö., Yağmur, M., Aydoğan, Y., 2021. Eskişehir Ekolojik Koşullarında Yetiştirilen Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Tarımsal Özellikleri Yönünden Değerlendirilmesi. Manas Journal of Agriculture Veterinary and Life Sciences, 11 (1): 35-47 s.
- Şakar, S., 2022. İdil/Şırnak Koşullarında Kışlık ve Erken İlkbaharda Yetiştirilen Nohut Çeşitlerinin Verim ve Verimle İlgili Özelliklerinin Belirlenmesi. Şırnak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Şırnak, 61 s.
- Şanlı, A., 2007. Tohum Muameleleri ile Farklı Ekim Zamanlarının Nohudun (*Cicer arietinum*) Verim ve Verim Unsurlarına Etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 80 s.
- Şeybeoğlu, A., 2017. Artan Dozlardaki Fosfor ve Çinko Gübrelemesinin Nohutta (*Cicer arietinum* L.) Verim ve Verim Öğeleri Üzerine Etkileri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Van, 59 s.
- Tetik, S., 2019. Türkiye’de Tescil Edilmiş Bazı Nohut Çeşitlerinin Bolu Şartlarında Verim ve Bazı Öğelerinin Tespit Edilmesi. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bolu, 46 s.
- Topçu, M., 2019. Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Edirne Koşullarında Verim ve Verim Unsurlarının İncelenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale, 49 s.
- Uzun, A., Özçelik, H., Yılmaz, S., 2012. Seçilmiş Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Hatlarının Agronomik ve Kalite Özellikleri Bakımından Değerlendirilmesi. Akademik Ziraat Dergisi, 1 (1), 29-36 s.
- Uçar, Ö., 2020. Farklı Sıra Arası Mesafeleri, Tavuk Gübresi Dozları ve Tohum Ön Uygulamalarının Nohudun (*Cicer arietinum* L.) Verim, Verim Öğeleri ve Nodülasyonu Üzerine Etkileri. Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Siirt, 235 s.

- Üyetürk, A.S., 2020. Farklı Toprak İşleme, Fosforlu Gübre ve Bakteri Uygulamalarının Nohutta (*Cicer arietinum* L.) Verim ve Verim Ögeleri Üzerine Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Eskişehir, 132 s.
- Varol, İ.S., 2018. Nohut Bitkisinde Farklı Gelişim Dönemlerinde Uygulanan Sulamaların Bitki Gelişimi Verim ve Verim Parametreleri Üzerine Etkisi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 97 s.
- Yaşar, M., 2010. Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Hat ve Çeşitlerinin Verim ve Verim Ögelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisan Tezi, Adana, 73 s.
- Yeşilgün, S., 2006. Çukurova Bölgesinde Bazı Kışlık Nohut (*Cicer arietinum* L.) Hat ve Çeşitlerinin Bitkisel ve Tarımsal Özelliklerinin Saptanması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisan Tezi, Adana, 54 s.
- Yiğit, M., 2018. Bazı Nohut Çeşitlerinin Farklı Tohum İriliği ve Ekim Zamanlarında Verim ve Kalite Performanslarının Belirlenmesi. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir, 102 s.
- Yolcu, R., 2008. Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Farklı Gelişme Dönemlerinde Sulanan Nohudun (*Cicer arietinum* L.) Sulama Suyu Gereksinimi ve Su Tüketimi Üzerine Bir Araştırma. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana, 92 s.
- Yücedağ, M., 2021. Bazı Nohut Çeşitlerinin Şanlıurfa-Bozova Koşullarında Verim ve Bazı Verim Ögelerinin Belirlenmesi. Mardin Artuklu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Mardin, 81 s.

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE DAYANIKLI/TOLERANSLI
SOYA FASULYESİ GENOTİPLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YETER ÇİLESİZ

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas-Türkiye
ycilesiz@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0002-4313-352X

ÖMER SÖZEN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas-Türkiye
omers@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0001-5528-7887

TOLGA KARAKÖY

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bitki Koruma Bölümü, Sivas-Türkiye
tkarakoy@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0002-5428-1907

ÖZET

Sivas ekolojik koşullarında bazı soya fasulyesi genotip/çeşitlerin iklim değişikliğine dayanıklılık ve tolerans düzeylerinin ortaya konulması amacıyla 2025 yılında Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarımsal Araştırma ve Uygulama Arazine ait deneme arazisinde tesadüf blokları deneme deseninde 3 tekerrürlü olacak şekilde yürütülen çalışmada, 15 adet soya fasulyesi genotipi ile 3 adet soya fasulyesi çeşidi (Arisoy, Ataem-7 ve Samsoy) kullanılmıştır. 1 yıl süre ile yürütülen araştırmada agronomik özellikler olan bitki boyu (cm), ilk bakla yüksekliği (cm), bitkide bakla sayısı (adet), baklada tane sayısı (adet), yüz tane ağırlığı (g), dekara tane verimi (kg/da), bakla boyu (cm), bakla eni (cm) ve bakla ağırlığı (g) incelenmiştir. Yürütülen araştırma sonucunda soya fasulyesi genotip/çeşitlerin 121.25-362.91 kg/da arasında dekara tane verimine sahip oldukları belirlenmiş olup en yüksek dekara tane verimi SF-3 nolu soya fasulyesi genotipinden elde edilirken en düşük dekara tane verimi ise SF-4 nolu soya fasulyesi genotipinde görülmüştür. Tüm soya fasulyesi genotip/çeşitlerinin ortalama dekara tane verim değerlerinin ise 203.92 kg/da olduğu saptanmıştır. Bunun yanında soya fasulyesi genotip/çeşitlerine bağlı olarak bitki boyunun 77.89-121.13 cm, ilk bakla yüksekliğinin 8.67-21.47 cm, bitkide bakla sayısının 41.40-107.15 adet, baklada tane sayısının 2.65-3.07 adet, yüz tane ağırlığının 4.24-11.37 g, bakla boyunun 2.78-4.78 cm, bakla eninin 0.52-1.07 cm ve bakla ağırlığının 0.17-0.34 g aralığında değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sivas, Soya Fasulyesi, Çeşit, Genotip, Agronomik Özellikler

**DEVELOPMENT OF CLIMATE CHANGE-RESILIENT/TOLERANT
SOYBEAN GENOTYPES**

ABSTRACT

This study was conducted in 2025 under the ecological conditions of Sivas to determine the resilience and tolerance levels of certain soybean genotypes/cultivars to climate change. The experiment was carried out at the experimental field of Sivas University of Science and Technology, Agricultural Research and Application Area, using a randomized complete block design with three replications. A total of 15 soybean genotypes and 3 registered cultivars (Arisoy, Ataem-7 ve Samsoy) were used as plant material. In this one-year study, agronomic traits including plant height, first pod height, number of pods per plant, number of seeds per pod, hundred-seed weight, seed yield per decare, pod length, pod width and pod weight were evaluated. The results revealed that seed yield per decare among soybean genotypes/cultivars ranged from 121.25-362.91 kg da⁻¹. The highest seed yield per decare was obtained from the soybean genotype SF-3, whereas the lowest value was recorded in genotype SF-4. The average seed yield per decare across all genotypes/cultivars was determined to be 203.92 kg da⁻¹. In addition, depending on the soybean genotypes/cultivars, plant height ranged from 77.89 to 121.13 cm, first pod height from 8.67 to 21.47 cm, number of pods per plant from 41.40 to 107.15, number of seeds per pod from 2.65 to 3.07, hundred-seed weight from 4.24 to 11.37 g, pod length from 2.78 to 4.78 cm, pod width from 0.52 to 1.07 cm, and pod weight from 0.17 to 0.34 g.

Keywords: Sivas, Soybean, Variety, Genotype, Agronomic Features

1. GİRİŞ

Küresel ısınma sonucu oluşan iklim değişiklikleri, etkileri ve sonuçları bakımından dünyanın tümünü yakından ilgilendiren önemli bir problem niteliğinde olup küresel ısınmanın temel sebebinin ekonomik faaliyetler sonucunda atmosferdeki sera gazının yoğunlaşarak olması gereken düzeyin üzerinde seyretmesi olarak görülmektedir. İklim değişikliklerine bağlı olarak atmosferin giderek ısınması sonucunda; buzulların erimesi ve deniz seviyesinin yükselmesi, bölgesel ve yerel yağış yapılarının değişmesi, ekstrem hava olaylarının sayı ve sıklığının artması, ekosistemlerin değişmesi nedeniyle bazı hayvan ve bitki türlerinin yok olmasına, sel, fırtına, kasırga ve kuraklık gibi iklimle ilgili doğal felaketlerin artmasına neden olacağı tahmin edilmektedir. Yukarıda belirtilen etkilerin pek çoğu, günümüzde halen ülkemiz başta olmak üzere tüm dünyada gözlenebilmekte ve sera gazı emisyonlarının artmasına bağlı olarak söz konusu etkilerin daha sonraki yıllarda giderek artacağı ön görülmektedir. İklim değişikliklerinin etkilediği başlıca sektörler arasında; gıda üretimi, balıkçılık, hayvancılık ve ormancılığı içine alan tarımsal faaliyetler ile diğer ekonomik ve sanayi faaliyetler gelmektedir. Bu faaliyetler içinde tarım sektörü; milli gelir, istihdam, dış ticaret, tarıma dayalı sanayi, destekleme ve tüketim harcamaları içindeki payı ile insanların zorunlu gıda maddelerini üreten bir sektör olması nedeniyle, ekonomilerde önemli bir yere sahiptir. Tarım doğaya bağlı olarak sürdürülen bir faaliyettir, teknoloji ne kadar gelişse de bu özelliğini kaybetmesi mümkün değildir. Tarımın ekonomik bir faaliyet olması, iklim değişikliği ile ortaya çıkacak üretim ile teknolojiye bağlı değişimler, hem ülke hem de uluslararası ticaret açısından önemlidir.

Soya özellikle Çin ve Güney Kore başta olmak üzere gelişmiş ve gelişmekte olan pek çok ülkede yaşayanların en önemli geçim kaynağıdır. Protein ve yağ içeriği bakımından oldukça zengindir. Soya, dünya çapında yağ bitkileri sınıfında oldukça önemli bir yere sahiptir. Bunun sebebi, soyanın çok yönlü kullanım alanlarının olması ve hızlı nüfus artışı nedeniyle bitkisel yağ tüketiminin sürekli artmasıdır. Ülkemizde soya üretimi ihtiyacın çok altında olduğu için her yıl giderek artan miktarlarda ithalat yapılmaktadır. Ülkemiz, soya üretimi yapılabilmesi için gerekli iklim ve toprak yapısına sahiptir. Fakat buna rağmen yeterince soya üretiminin yapılamaması, ithalat miktarını her geçen gün artırmaktadır. Ülkemizde soya ekimi yaygınlaştırılarak yüksek verim ve kaliteye sahip yeni çeşitlerin geliştirilmesi ile ihtiyacımız olan soya miktarı, yerli üretimle karşılanabilecek seviyeye getirilebilecektir. Yerli üretimi artırmak için İç Anadolu Bölgesi gibi soyanın rahatlıkla yetiştirilebileceği yerlerde, soyanın ekim nöbeti içine dahil edilmesi ve bu bölgelere uygun yüksek verimli ve kaliteli yeni çeşitlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Soyada verim ve kalite üzerine genotip, çevre ve genotip x çevre etkileşimi çok önemli etkilere sahiptir.

Bu proje kapsamında; soya fasulyesi genotipleri içinden iklim değişikliklerine karşı dayanıklı genotiplerin Türk tarımına sunulması hedeflenmiştir. Böylece, ülkemizde iklim değişikliklerine karşı geliştirilecek soya fasulyesi genotiplerinin Türk tarımına sunulmasıyla ön görülen iklim değişikliği senaryolarına karşı germplasmanın oluşturularak tüm ıslah programlarında kullanılarak önü açılmış olacaktır.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. MATERYAL

Bu araştırmanın tarla denemeleri 2025 yılında bir yıl süreyle soya fasulyesi vejetasyonu döneminde Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'ne bağlı AR-GE Tarımsal Araştırma Merkezi'nin ıslah amaçlı deneme arazisinde yürütülmüştür. Araştırma yerinin denizden yüksekliği 1285 m olup 39.72072 enlem ve 36.91786 boylam dereceleri arasında yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Araştırmanın yürütüldüğü deneme arazisi

Farklı yıllarda yürütülen soya fasulyesi ebeveynlerinden oluşturulan melezleme ıslah programları kapsamında elde edilen tek bitkilerden seçilen ve tarla koşullarında gerçekleştirilen seleksiyon sonucunda ileri düzeye kadar getirilmiş 15 adet soya fasulyesi genotipi ile kıyaslama yapmak üzere 3 adet soya fasulyesi (Arisoy, Ataem-7 ve Samsoy) çeşidi araştırmanın materyali olarak belirlenmiştir (Tablo 1 ve 2).

Tablo 1. Araştırmada materyal olarak kullanılan soya fasulyesi çeşitleri

ÇEŞİTLER	ARISOY	ATAEM-7	SAMSOY
Tescil Yılı	2006	2006	2019
Çeşit Sahibi Kuruluş	Çukurova Üniversitesi (Adana)	BATEM (Antalya)	KTAE (Samsun)
Bitki Boyu (cm)	95-125	100-120	115
Büyüme Şekli	yarı dik	yarı dik	yarı dik
100 Tane Ağırlığı (g)	16-19	15-16	20.2
Bitkide Bakla Sayısı (adet)	75	70-90	90
Verim (kg/da)	500-600	350-450	435
Tohum Şekli	yuvarlak	yuvarlak	yuvarlak
Tohum Rengi	açık kahverengi	açık kahverengi	açık kahverengi

Tablo 2. Araştırmada materyal olarak kullanılan soya fasulyesi genotipleri

Sıra No	Soya Fasulyesi Genotipleri
1	SF-1
2	SF-2
3	SF-3
4	SF-4
5	SF-5
6	SF-6
7	SF-7
8	SF-8
9	SF-9
10	SF-10
11	SF-11
12	SF-12
13	SF-13
14	SF-14
15	SF-15

Araştırma Yerinin İklim Özellikleri

Denemenin kurulduğu lokasyonun soya fasulyesi vejetasyonu dönemine ait uzun yıllar ortalaması (2000-2024 yılları arası) ile çalışmanın gerçekleştirildiği 2025 yılına ait meteorolojik veriler Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Sivas ilinin 2025 yılı ile uzun yıllara ait iklim verileri

Aylar	Ortalama Sıcaklık (° C)		Toplam Yağış (mm)		Ortalama Nispi Nem (%)	
	2025	Uzun Yıllar	2025	Uzun Yıllar	2025	Uzun Yıllar
Mayıs	13.0	13.5	66.3	52.4	62.7	60.9
Haziran	18.8	17.3	15.4	43.4	60.1	58.7
Temmuz	22.1	20.0	2.4	6.2	55.8	53.9
Ağustos	24.2	20.2	3.1	4.5	57.2	53.3
Eylül	18.6	16.2	20.6	16.6	53.6	55.6
Ekim	16.8	14.4	18.2	21.9	55.1	56.2
Toplam			126.0	146.0		
Ortalama	18.91	16.93			57.42	56.43

Tablo değerlendirildiğinde uzun yıllara ait ortalama değerler ile denemelerin kurulduğu 2025 yılına ait aylık sıcaklık ortalamaları arasında aylar kapsamında büyük bir farkın olmadığı görülmektedir. Uzun yıllar ortalaması, en düşük aylık sıcaklık ortalamasının 13.5 °C ile Mayıs ayında, aylık en yüksek sıcaklık ortalamasının ise 20.2 °C ile Ağustos ayında olduğu görülmüştür. 2025 yılına ait deneme periyotlarındaki bu değerler 13.0 °C ile Mayıs ve 24.2 °C ile Ağustos aylarında sıralanmıştır. Bunun yanında 2025 yılı aylık toplam yağış değerlerinde Mayıs ve Eylül ayları aylık yağış toplamalarının uzun yıllardan aynı aylara göre yüksekte kaldığı geriye kalan ayların ise uzun yıllar ortalamasının altında seyrettiği, aylık ortalama nispi nem verileri gözlemlendiğinde ise uzun yıllar ortalama verileri ile deneme yılının birbirine yakın değerler elde ettikleri görülmüştür.

Toprak Özellikleri

Çalışmanın bir yıl olarak yürütüldüğü deneme parselinin toprak ögeleri incelendiğinde deneme parselinin toprağının alkali seviyesinin hafif (7.25), organik madde içeriğinin orta (%1.65), alınabilir fosfor (3.50) ve potasyum düzeyleri (92.45) bakımından orta, tuz seviyesinin tuzlu (%0.31) ve kireç içeriğinin ise kireçli (18.8) olduğu ortaya konulmuştur (Tablo 4).

Tablo 4. Deneme yeri toprağına ait fiziksel ve kimyasal özellikleri

Yıllar	Tekstür	pH	Kireç (% CaCO ₃)	Toplam Tuz (%)	Fosfor (P ₂ O ₅)	Potasyum (K ₂ O)	Organik Madde (%)
2025	Siltli killi tın	7.25	18.8	0.31	3.50	92.45	1.65

2.2. METOT

Araştırmanın yürütüldüğü deneme arazisinin ön bitkisi şeker pancarı olup şeker pancarının hasadı sonrasında pullukla sürülerek kış yağmurlarına bırakılmıştır. Ekim öncesinde deneme arazisine önce diskaro sokularak yabancı otlardan arındırılmış ardından rotovator ile ekim için hazır hale getirilmiştir. Araştırma, Tesadüf Blokları Deneme Deseninde 3 tekerrürlü olacak şekilde kurulmuş olup parseller 5.0 m x 2.8 m= 14.0 m² ebatlarına sahiptir. 15 adet soya fasulyesi genotipi ile 3 adet standart çeşit olmak üzere toplam 18 adet genotipin parsellere dağıtımı tesadüfi olarak yapılmıştır. Denemenin ekimleri 22 Mayıs 2025 tarihinde tavlı toprağına gerçekleştirilmiştir. Ekimler 70 cm sıra aralığında 10 cm sıra üzerinde, her bir sraya 50 adet tohum düşecek şekilde markörle açılan sıralara 3-5 cm derinliğe elle yapılmıştır. Her parsel 4 sıradan oluşmuştur. Yabancı otlarla mücadele etmek üzere ekim sonrası çıkış öncesi yabancı ot ilacı uygulanmış ve vejetasyon süresince 2 sefer çapa yapılmıştır. Denemenin sulama ihtiyacını karşılamak üzere yağmurlama sulama sistemi kurulmuş ve tüm vejetasyon boyunca ihtiyaç duyulduğu dönemlerde sulama (8 adet) gerçekleştirilmiştir. Ekim öncesi hazırlanan parsellere dekara 20

kg DAP (%18 N, %46 P₂O₅) gübresi (3.6 kg/da N ve 9.2 kg/da P) ve daha sonra birinci sudan öncede 20 kg/da %33'lük amonyum nitrat uygulanmıştır. Araştırmanın yürütüldüğü deneme alanındaki genotiplerin hasadı hasat olgunluğuna ulaştıkları dönem aralığı olan 26-28 Ekim tarihleri arasında el ile yapılmıştır. Dörder sıradan oluşan her parselin her iki yanından birer sıra ile parsel başı ve sonundan 50 cm'lik kısımlar kenar tesiri olarak atılmak suretiyle 4.0 m x 1.4 m= 5.6 m²'lik alanda yer alan bitkiler hasat edilmiştir. Her bir parselden hasat edilen bitkiler ayrı ayrı çuvallara konulup etiketlenerek hasat-harman sonrası gerekli ölçümler ve analizler yapılmak üzere Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümüne ait harman odasına getirilmiştir.

Verilerin Değerlendirilmesi

Araştırma sonucunda elde edilen veriler Tesadüf Blokları Deneme Desenine göre JUMP 13.0 istatistik programı ile varyans analizine tabi tutulup ortalamalar arasındaki farklılıklar LSD Çoklu Karşılaştırma Yöntemi'ne göre belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Bitki Boyu (cm)

Çalışmada yer alan 15 adedi soya fasulyesi genotipi, 3 adedi standart soya fasulyesi çeşidi olmak üzere 18 adet soya fasulyesi genotip/çeşidin ortalama bitki boyu değerleri Tablo 5'de verilmiş olup gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda incelenen agronomik özelliklerden birisi olan bitki boyu açısından soya fasulyesi genotipleri ile çeşitler arasında çok önemli derecede (P<0.01) istatistiki farkın bulunduğu görülmüştür.

Tablo 5. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait bitki boyu (cm) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BB	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BB
1	SF-3	92.80 efg	10	SF-14	80.13 hij
2	ARISOY	97.53 d	11	SF-13	94.47 e
3	SF-6	85.27 g	12	SF-11	83.13 gh
4	SAMSOY	93.85 ef	13	SF-2	110.27 bc
5	SF-10	77.89 ı	14	SF-7	96.67 de
6	SF-1	82.08 h	15	SF-8	96.73 de
7	ATAEM-7	111.47 b	16	SF-15	107.20 c
8	SF-9	121.13 a	17	SF-12	96.40 def
9	SF-5	90.13 f	18	SF-4	
Minimum - Maximum		77.89-121.13			
Genotip Ortalaması		93.02			
Çeşit Ortalaması		100.95			
Genel Ortalama		94.35			
Önemlilik		**			
CV (%)		9.12			

Yürütülen çalışmada yer alan standart soya fasulyesi çeşitleri bakımından Tablo incelendiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bitki boyu 111.47 cm ile Ataem-7 çeşidinden elde edilmiş olup bu çeşidi 97.53 cm ile Arısoy çeşidi izlemiş olup bu çeşitler sırasıyla b ve d gruplarında yer almışlardır. Çeşitler içerisinde en düşük bitki boyu ise 93.85 cm ile Samsoy çeşidinde görülmüş olup standart soya fasulyesi çeşitlerinin ortalama bitki boyu değerinin ise 100.95 cm olarak ortaya konulduğu belirlenmiştir. Yürütülen çalışmada yer alan 15 adet soya fasulyesi genotipi bitki boyu bakımından değerlendirildiğinde en yüksek bitki boyu 121.13 cm ile SF-9 nolu genotipte belirlenirken bu genotipi 110.27 cm ve 107.20 cm bitki boyu değerleri ile SF-2 ve SF-15 nolu genotipler izlemiş olup bu üç genotip sırasıyla "a, bc ve c" grupları içerisinde yer almışlardır. Buna karşın çalışmada en düşük bitki boyu ise 77.89 cm ile SF-10 nolu genotipte saptanırken tüm soya fasulyesi genotiplerinin ortalama bitki boyunun ise 93.02 cm olarak ölçüldüğü ortaya konulmuştur. Bitki boyu adına elde edilen bu değer standart çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 94.35 cm değerine yakın

olduğu belirlenmiştir. Bu agronomik özellik üzerinde yürütülen diğer araştırmalarda Karasu ve ark. (2002) 77.30-136.10 cm, Cinsoy ve ark. (2005) 90.00-120.00 cm, Beyyavaş ve ark. (2007) 108.00-120.00 cm, Tayyar ve Gül (2007) 50.50-63.00 cm, Karaaslan (2011) 108.70-138.80 cm, Barış (2016) 61.53-85.93 cm, Güngör ve Üstün (2015) 93.10-130.90 cm, Şenyiğit ve ark. (2015) 85.20-108.90 cm, Acar (2015) 79.37-126.07 cm, Bakal ve ark. (2016) 89.90-131.50 cm, Altınyüzük ve Öztürk (2017) 74.10-113.10 cm, Andırman ve ark. (2019) 77.60-101.00 cm, Özüstün (2022) Adana lokasyonunda 41.30-85.60 cm; Aydın lokasyonunda 32.20-78.90 cm ve Ekinci (2023) 110.80-125.70 cm değerlerine ulaşmışlardır. Yürütülen çalışmada bitki boyuna ait belirlenen değer aralığının (77.89-121.13 cm), bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer araştırmacıların buldukları değerlerin (32.2-138.8 cm) aralığında yer aldığı ve diğer yürütülmüş çalışmalarla paralellik gösterdiği görülmüştür.

3.2. İlk Bakla Yüksekliği (cm)

Yürütülen çalışmada yer alan soya fasulyesi genotiplerinin ilk bakla yükseklik değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda incelenen özelliklerden birisi olan ilk bakla yüksekliği açısından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiştir.

Tablo 6. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait ilk bakla yüksekliği (cm) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	İBY	Sıra No	Genotip/Çeşitler	İBY
1	SF-3	14.47 g	10	SF-14	13.80 h
2	ARISOY	15.73 ef	11	SF-13	16.80 de
3	SF-6	20.20 b	12	SF-11	8.67 j
4	SAMSOY	14.28 gh	13	SF-2	19.80 bc
5	SF-10	16.24 e	14	SF-7	19.80 bc
6	SF-1	15.25 f	15	SF-8	16.60 def
7	ATAEM-7	18.27 cd	16	SF-15	13.27 hı
8	SF-9	21.47 a	17	SF-12	18.40 c
9	SF-5	12.33 ı	18	SF-4	16.93 d
Minimum - Maximum		8.67-21.47			
Genotip Ortalaması		16.27			
Çeşit Ortalaması		16.09			
Genel Ortalama		16.24			
Önemlilik		**			
CV (%)		9.45			

Standart çeşitler bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek ilk bakla yükseklik değeri 18.27 cm ile Ataem-7 çeşidinden elde edilirken bu çeşidi 15.73 cm ile Arısoy çeşidi izlemiş olup bu çeşitler sırasıyla “cd ve ef” gruplarında yer almışlardır. Çeşitler içinde en düşük ilk bakla yüksekliği ise 14.28 cm ile Samsoy çeşidinde tespit edilmiş olup standart soya fasulyesi çeşitlerinin ortalama ilk bakla yükseklik değerinin ise 16.09 cm olarak ölçüldüğü görülmüştür. Yürütülen çalışmada yer alan soya fasulyesi genotipleri ilk bakla yüksekliği bakımından değerlendirildiğinde en yüksek ilk bakla yüksekliği 21.47 cm ile SF-9 genotipinde tespit edilmiş olup bu çeşidi 20.20 cm ve 19.80 cm ilk bakla yükseklik değerleri ile SF-6, SF-2 ve SF-7 nolu genotiplerin izlemiş olduğu ve her üç genotipinde sırasıyla “b ve bc” grubunda yer aldıkları saptanmıştır. Buna karşın ilk bakla yüksekliği kapsamında en düşük değer ise 8.67 cm ile SF-11 nolu genotipte “j” grubu ile ortaya konulmuştur. Tüm soya fasulyesi genotiplerinin ortalama ilk bakla yüksekliğinin 16.27 cm olarak belirlendiği çalışmada bu değer, standart çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 16.24 cm değerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Tanrıverdi ve ark. (2000) 8.00-13.80 cm, Karasu ve ark. (2002) 14.10-23.70 cm, Bayraktar ve ark. (2007) 6.00-19.30 cm, Beyyavaş ve ark. (2007) 8.20-17.60 cm, Tayyar ve Gül (2007) 13.10-20.60 cm, Gaffaroğlu (2008) 12.40-22.10 cm, Karaaslan (2011) 9.20-15.40 cm, Acar

(2015) 22.07-40.30 cm, Barış (2016) 15.60-21.20 cm, Güngör ve Üstün (2015) 18.90-30.00 cm, Şenyiğit ve ark. (2015) 16.50-23.00 cm, Boydak ve ark. (2018) 40.30 cm, Ekinci (2023) 15.73-21.33 cm ve Çiller (2025) 13.90-19.63 cm değerlerini elde etmişlerdir. İlk bakla yüksekliği üzerine bulunmuş olan değer aralığının (8.67-21.47 cm) bu özellik üzerine çalışmalar yürüten araştırmacıların ortaya koymuş oldukları değerlerin aralıklarında (6.00-40.30 cm) bulunup bulgularımızla paralellik göstermektedirler.

3.3. Bitkide Bakla Sayısı (adet)

Çalışmada yer alan 18 adet soya fasulyesi genotip/çeşidin ortalama bitkide bakla sayısı değerlerinin verildiği Tablo 7’de varyans analizi sonucunda incelenen özelliklerden olan bitkide bakla sayısı açısından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiştir.

Tablo 7. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait bitkide bakla sayısı (adet) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BBS	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BBS
1	SF-3	107.15 a	10	SF-14	71.93 f
2	ARISOY	97.50 b	11	SF-13	76.42 efg
3	SF-6	104.07 ab	12	SF-11	69.53 fg
4	SAMSOY	86.60 cd	13	SF-2	76.47 efg
5	SF-10	82.73 de	14	SF-7	69.33 fg
6	SF-1	79.73 e	15	SF-8	65.87 gh
7	ATAEM-7	89.27 c	16	SF-15	57.40 h
8	SF-9	77.53 ef	17	SF-12	66.03 g
9	SF-5	84.16 d	18	SF-4	41.40 ı
Minimum - Maximum		41.40-107.15			
Genotip Ortalaması		75.32			
Çeşit Ortalaması		91.12			
Genel Ortalama		77.95			
Önemlilik		**			
CV (%)		12.36			

Soya fasulyesi çeşitleri bakımından Tablo incelendiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bitkide bakla sayısı 97.50 adet ile Arısoy çeşidinde (b grubu) saptanırken bu çeşidi “c” grubunda 89.27 adet ile Ataem-7 çeşidi izlemiş, buna karşın en düşük bitkide bakla sayısı “cd” grubunda yer alan Samsoy çeşidinde 86.60 adet ile belirlenmiş olup tüm çeşitlerin ortalama bitkide bakla sayısı değerinin ise 91.12 adet olarak ölçüldüğü görülmüştür. Bitkide bakla sayısı kapsamında soya fasulyesi genotipleri değerlendirildiğinde en yüksek bitkide bakla sayısı a grubunda yer alan SF-3 genotipinde 107.15 adet olarak ortaya konulurken bu genotipi ab grubunda yer alan SF-6 nolu genotip 104.07 adet ile takip etmiştir. Buna karşın en düşük bitkide bakla sayısı SF-4 nolu genotipte 41.40 adet ile belirlenmiş olup bu genotipin “ı” grubunda yer aldığı görüldürken tüm genotiplerin ortalama bitkide bakla sayısı değerinin ise 75.32 adet olarak belirlendiği saptanmıştır. Genotiplerin ortalaması olan bu değer standart çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 77.95 adet değerinin altında kaldığı görülmüştür. Bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Karasu ve ark. (2002) 39.80-60.8 adet, Çopur ve ark. (2005) 62.30-97.00 adet, Bayraktar ve ark. (2007) 28.00-93.30 adet, Tayyar ve Gül (2007) 17.90-27.90 adet, Sincik ve ark. (2008) 53.4-61.6 adet, Karaaslan (2011) 51.20-70.6 adet, Malik ve ark. (2011) 26.00-130.00 adet, Dolapçı (2012) 58.66-70.83 adet, Güngör ve Üstün (2015) 38.70-49.00 adet, Mert (2015) 36.33-48.33 adet, Ertaş (2017) 78.37-215.83 adet, Andırman ve ark. (2019) 65.43-102.10 adet, Gümüş (2020) 81.50-133.90 adet, Ekinci (2023) 64.86-93.86 adet ve Çiller (2025) 72.70-87.03 adet değerlerine ulaşmışlardır. Yürütülen çalışmada bitkide bakla sayısına ait belirlenen değer aralığının (41.40-107.15 adet), bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer araştırmacıların buldukları değerlerin (17.90-133.90 adet) aralığında yer aldığı ve diğer yürütülmüş çalışmalarla paralellik gösterdiği görülmüştür.

3.4. Baklada Tane Sayısı (adet)

Çalışmada yer alan 18 adet soya fasulyesi genotip/çeşidinin ortalama baklada tane sayısı değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Varyans analizi sonucunda incelenen özelliklerden olan baklada tane sayısı açısından genotip ve çeşitler arasında önemli derecede ($P<0.05$) istatistikî farkın bulunduğu belirlenmiştir.

Tablo 8. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait baklada tane sayısı (adet) değerleri ve istatistikî gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BTS	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BTS
1	SF-3	2.96 e	10	SF-14	2.92 f
2	ARISOY	3.07 a	11	SF-13	2.92 f
3	SF-6	2.65 j	12	SF-11	2.87 h
4	SAMSOY	3.01 c	13	SF-2	2.95 ef
5	SF-10	2.98 d	14	SF-7	2.89 g
6	SF-1	3.00 cd	15	SF-8	3.03 b
7	ATAEM-7	2.84 ı	16	SF-15	2.83 ij
8	SF-9	2.87 h	17	SF-12	2.89 g
9	SF-5	2.91 fg	18	SF-4	2.84 ı
Minimum - Maximum		2.65-3.07			
Genotip Ortalaması		2.90			
Çeşit Ortalaması		2.97			
Genel Ortalama		2.91			
Önemlilik		*			
CV (%)		5.88			

Araştırmada yer alan standart çeşitler bakımından Tablo incelendiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek baklada tane sayısı 3.07 adet ile Arısoy çeşidinde saptanırken bu çeşit aynı zamanda tüm genotip/çeşitler içinde ‘a’ grubu ile ilk sırada yer almıştır. Bu çeşidi 3.01 adet ile Samsoy çeşidi ‘c’ grubu ile izlemiştir. Çalışmada baklada tane sayısı bakımından en son sırada yer alan çeşidin 2.84 adet ile Ataem-7 olduğu ve bu çeşidin ‘j’ grubunda yer aldığı görülmüş olup tüm çeşitlerin ortalama baklada tane sayısı değerinin 2.97 adet olarak ölçüldüğü ortaya konulmuştur. Yürütülen çalışmada baklada tane sayısı kapsamında soya fasulyesi genotipleri gözlemlendiğinde en yüksek baklada tane sayısı 3.03 adet ile SF-8 nolu genotipte tespit edilirken bu genotipi 3.00 adet ile SF-1 ve 2.98 adet ile SF-10 nolu genotipler izlemiş olup her üç genotipte sırasıyla ‘b, cd ve d’ gruplarında yer aldıkları ve tüm soya fasulyesi genotiplerinin ortalama baklada tane sayısı değerinin 2.90 adet olarak ölçüldüğü belirlenmiştir. Çalışma kapsamında soya fasulyesi genotipleri adına elde edilen bu değer standart çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 2.91 adet ile neredeyse aynı olduğu da ortaya konulmuştur. Bu özellik üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Karasu ve ark. (2002) 1.76-2.14 adet, Bakoğlu ve Ayçiçek (2005) 2.00-3.90 adet, Güneş (2006) 2.42-2.64 adet, Yetim (2008) 2.30-2.61 adet, Kınacı (2011) 2.00-3.00 adet, Çetin ve Öztürk (2012) 2.80-3.10 adet, Dolapçı (2012) 2.66-3.93 adet, Acar (2015) 2.47-2.78 adet, Altınyüzük ve Öztürk (2017) 1.90-3.90 adet, Delice (2017) 1.00-4.00 adet, Ertaş (2017) 2.30-3.10 adet, Karabulut (2018) 2.377-2.873 adet ve Ekinci (2023) 2.07-2.75 adet arasında baklada tane sayısı değerlerine ulaşmışlardır. Baklada tane sayısı üzerine bulmuş olduğumuz değer aralığının (2.65-3.07), araştırmacıların bulmuş olduğu değerlerin aralığında (1.00-4.00 adet) yer aldığı ve bulgularımızla paralellik gösterdiği görülmüştür.

3.5. Yüz Tane Ağırlığı (g)

Önemli bir agronomik özellik olan yüz tane ağırlığı kapsamında çalışmada yer alan 18 adet soya fasulyesi genotip/çeşidinden elde edilen değerler Tablo 9’da verilmiş olup gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda incelenen özelliklerden olan yüz tane ağırlığı açısından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistikî farkın bulunduğu belirlenmiştir. Çalışmada yer alan standart çeşitlerden bloklar ortalaması olarak en yüksek yüz tane ağırlığı 9.92 g (b grubu) ile Samsoy çeşidinde

belirlenirken bu çeşidi 8.62 g ile Arısoy çeşidi izlemiş olup bu çeşidin “b” grubunda yer aldığı saptanmıştır.

Tablo 9. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait yüz tane ağırlığı (g) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	YTA	Sıra No	Genotip/Çeşitler	YTA
1	SF-3	9.50 c	10	SF-14	6.48 g
2	ARISOY	8.62 d	11	SF-13	8.46 de
3	SF-6	11.37 a	12	SF-11	5.93 h
4	SAMSOY	9.92 b	13	SF-2	6.34 gh
5	SF-10	9.16 cd	14	SF-7	6.46 g
6	SF-1	6.25 gh ₁	15	SF-8	4.96 ij
7	ATAEM-7	7.37 f	16	SF-15	4.29 j
8	SF-9	5.39 h ₁	17	SF-12	5.04 ı
9	SF-5	7.86 e	18	SF-4	4.24 jk
Minimum - Maximum		4.24-11.37			
Genotip Ortalaması		6.78			
Çeşit Ortalaması		8.64			
Genel Ortalama		7.09			
Önemlilik		**			
CV (%)		4.62			

Çalışmada soya fasulyesi çeşitleri içerisinde en düşük yüz tane tane ağırlığı 7.37 g ile Ataem-7 çeşidinde ortaya konulurken bu çeşidin “f” grubunda yer aldığı görülmüş olup tüm soya fasulyesi çeşitlerinin ortalama yüz tane ağırlık değerinin ise 8.64 g olarak ölçüldüğü belirlenmiştir. Yürütülen çalışmada yer alan soya fasulyesi genotipleri yüz tane ağırlığı kapsamında değerlendirildiğinde en yüksek yüz tane ağırlığı SF-6 nolu genotipte 11.37 g olarak belirlenirken bu genotipi 9.50 g ile SF-3 ve 9.16 g ile SF-10 nolu genotipler izlemiş ve her üç genotipin de “a, c ve cd” grubunda yer aldıkları görülmüştür. Buna karşın çalışmada soya fasulyesi genotipleri içinde SF-4 almış olduğu 4.24 g yüz tane ağırlığı değeri ile tüm genotipler içinde son sırada yer alırken bu genotip “jk” grubunda kalmıştır. Tüm soya fasulyesi genotiplerinin ortalama yüz tane ağırlık değerinin 6.78 g olarak ölçüldüğü çalışmada elde edilen bu değer standart çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 7.09 g değerinin altında kaldığı saptanmıştır. Bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer araştırmalarda Çarkçı (1998) 11.80-15.20 g, Yılmaz ve Efe (1998) 10.00-12.30 g, Çelik ve ark. (2001) 13.04-19.07 g, Karasu ve ark. (2002) 17.60-19.40 g, Arslan ve Arıoğlu (2003) 10.70-20.10 g, Bakoğlu ve Ayçiçek (2005) 6.00-17.00 g, Söğüt (2005) 14.40-18.10 g, Söğüt ve ark. (2005) 14.00-17.00 g, Güneş (2006) 13.61-15.74 g, Sarımehtetoğlu (2006) 16.28-16.60 g, Acar ve ark. (2007) 10.72-20.26 g, Arslan (2007) 18.90-21.40 g, Beyyavaş ve ark. (2007) 12.97-17.00 g, Kolay (2007) 10.00-13.00 g, Ünal (2007) 17.12-22.23 g, Yetim (2008) 13.60-18.30 g, Yaver ve Paşa (2009) 15.07-18.44 g, Çetin ve Öztürk (2012) 13.70-14.90 g, Dolapçı (2012) 11.58-15.17 g, Acar (2015) 11.71-15.70 g, Arıoğlu ve ark. (2005) 19.09-16.74 g, Barış (2016) 11.21-14.47 g, Mert (2015) 10.69-14.46 g, Bakal ve ark. (2016) 12.98-15.34 g, Altınyüzük ve Öztürk (2017) 15.24-20.04 g, Erbil ve Gür (2016) 14.25-18.37 g, Ertaş (2017) 12.70-17.60 g, Yıldırım (2017) 13.78-22.91 g ve Ekinci (2023) 10.47-12.29 g değerlerini elde etmişlerdir. Yürütülen denemede yüz tane ağırlığı üzerine değer aralığının (4.24-11.37 g), bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer çalışmalarda verilen değerlerin (6.00-22.91 g) aralığında bulunduğu ve diğer yürütülmüş çalışmalarla benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Yukarıda verilmiş literatürlerde yüz tane ağırlığına ait olan değerler içerisinde bir kısmı yürütmüş olduğumuz çalışmamızdan daha erken olarak gerçekleşirken bazı çalışmalarda ise vejetasyon süreleri daha geç olmuştur. Elde edilen bu farklı değerlerin çalışmada yer alan genotip ile çeşitlerin genetik özelliklerinin yanında ekolojik farklılıklar ve kültürel uygulamaların farklı şekillerde kullanılmasından kaynaklanmış olabileceği ön görülmektedir.

3.6. Dekara Tane Verimi (kg/da)

Seleksiyon yoluyla seçilmiş 15 adet soya fasulyesi genotipi ile araştırmada kontrol çeşit olarak kullanılan 3 adet standart çeşidin ortalama tane verim değerleri Tablo 10’da verilmiştir. Yapılan varyans analizi sonucunda incelenen özelliklerden olan tane verimi açısından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiştir. Çalışmada yer alan soya fasulyesi çeşitleri bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek tane verimi 302.77 kg/da ile Arısoy çeşidinde görülürken bu çeşidi 253.92 kg/da ile Samsoy çeşidi izlemiş olup bu çeşitlerin sırasıyla “b ve d” grubunda yer aldıkları buna karşın Ataem-7 çeşidinin ise 231.12 kg/da tane verim değeri ile çeşitler içinde son sırada yer aldığı ve “ef” grubunda bulunduğu ortaya konulmuş olup tüm çeşitlerin ortalama tane verim değerinin ise 262.60 kg/da olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Yürütülen çalışmada yer alan soya fasulyesi genotipleri tane verimi açısından incelendiğinde en yüksek tane verim değeri 362.91 kg/da ile SF-3 nolu genotipte görülürken bu genotipi 275.13 kg/da ile SF-6 ve 239.86 kg/da ile SF-10 nolu genotipler izlemiş olup bu 3 genotipin sırasıyla “a, c ve de” gruplarında yer aldıkları saptanmıştır. Tüm genotipler içinde tane verimi değeri açısından SF-4 nolu genotipi 121.25 kg/da ve “jk” grubu ile son sırada yer alırken ortalama tane verim değerinin soya fasulyesi genotipleri adına 192.18 kg/da olarak ölçüldüğü ortaya konulmuştur. Bu değer standart çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 203.92 kg/da değerinin altında kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 10. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait tane verimi (kg/da) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	TV	Sıra No	Genotip/Çeşitler	TV
1	SF-3	362.91 a	10	SF-14	186.09 gh
2	ARISOY	302.77 b	11	SF-13	184.30 gh ₁
3	SF-6	275.13 c	12	SF-11	163.12 h
4	SAMSOY	253.92 d	13	SF-2	148.04 ₁
5	SF-10	239.86 de	14	SF-7	144.41 ij
6	SF-1	235.80 e	15	SF-8	142.18 ijk
7	ATAEM-7	231.12 ef	16	SF-15	141.49 ijk
8	SF-9	217.80 f	17	SF-12	125.27 j
9	SF-5	195.12 g	18	SF-4	121.25 jk
Minimum - Maximum		121.25-362.91			
Genotip Ortalaması		192.18			
Çeşit Ortalaması		262.60			
Genel Ortalama		203.92			
Önemlilik		**			
CV (%)		13.65			

Bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı ve bitkide tane verimi ile çok önemli ve pozitif ilişki içinde olan tane verimi üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Oba (1996) 193.20-314.30 kg, Boydak (1997) 244.00-357.00 kg, Karasu ve ark. (2002) 166.50-210.70 kg, Bakoğlu ve Ayçiçek (2005) 200.00-310.00 kg, Cinsoy ve ark. (2005) 122.00-367.00 kg, Söğüt (2005) 185.00-293.00 kg, Zaimoğlu ve ark. (2005) 91.20-379.50 kg, Güneş (2006) 274.75-350.74 kg, Acar ve ark. (2007) 182.00-321.00 kg, Kolay (2007) 125.00-134.00 kg, Tayyar ve Gül (2007) 171.00-341.00 kg, Karaaslan (2011) 121.36-275.80 kg, Arıoğlu ve ark. (2005) 275.20-367.40 kg, Eren ve ark. (2012) 311.00-448.00 kg, Sabancı (2013) 121.83-427.85 kg, İstemil (2015) 270.09-355.37 kg, Doğan ve ark. (2015) 261.60-252.40 kg, Acar (2015) 128.23-239.10 kg, Barış (2016) 170.50-214.15 kg, Bakal ve ark. (2016) 381.90-466.70 kg, Altınyüzük ve Öztürk (2017) 395.20-489.90 kg, Çalışkan ve Aytekin (2017) 135.20-295.80 kg, Ertaş (2017) 217.00-413.39 kg, Andırman ve ark. (2019) 183.93-279.33 kg, Demirel (2020) 113.23-348.65 kg, Ekinci (2023) 85.30-201.75 kg ve Çiller (2025) 437.00-596.00 kg değerlerine ulaşmışlardır. Yürütülen çalışmada tane verimine ait belirlenen değer aralığının (121.25-362.91 kg/da), bu agronomik özellik üzerine yürütülen

diğer araştırmacıların buldukları değerlerin (85.30-596.00 kg/da) aralığında yer aldığı ve diğer yürütölmüş çalışmalarla paralellik gösterdiği görölmüştür.

3.7. Bakla Boyu (cm)

Çalışmada yer alan 18 adet genotip/çeşidin ortalama bakla boyu değerleri Tablo 11’de verilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda incelenen özelliklerden olan bakla boyu açısından genotip ve çeşitler arasında çok önemli derecede ($P<0.01$) istatistiki farkın bulunduğı belirlenmiştir. Çalışmada yer alan soya fasulyesi çeşitleri bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bakla boyu 4.72 cm ile Ataem-7 çeşidinde görölürken bu çeşidi 4.70 cm ile Arısoy çeşidi izlemiş olup bu çeşitlerin sırasıyla “ab” grubunda yer aldıkları buna karşın Samsoy çeşidinin ise 4.23 cm bakla boyu değeri ile çeşitler içinde son sırada yer aldığı ve “ef” grubunda bulunduğı ortaya konulmuş olup tüm çeşitlerin ortalama bakla boyu değerinin ise 4.55 cm olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Yürütölen çalışmada yer alan soya fasulyesi genotipleri bakla boyu açısından incelendiğinde en yüksek bakla boyu değeri 4.78 cm ile SF-14 nolu genotipte görölürken bu genotipi 4.67 cm ile SF-9 ve 4.61 cm ile SF-12 nolu genotipler izlemiş olup bu 3 genotipin sırasıyla “a, b ve bc” gruplarında yer aldıkları saptanmıştır. Tüm genotipler içinde bakla boyu değeri açısından SF-6 nolu genotipi 2.78 cm ve “h” grubu ile son sırada yer alırken ortalama bakla boyu değerinin soya fasulyesi genotipleri adına 4.31 cm olarak ölçüldüğü ortaya konulmuştur. Bu değer in standart çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 4.35 cm değerine çok yakın olduğı tespit edilmiştir.

Tablo 11. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait bakla boyu (cm) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BB	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BB
1	SF-3	4.56 c	10	SF-14	4.78 a
2	ARISOY	4.70 ab	11	SF-13	4.11 f
3	SF-6	2.78 h	12	SF-11	4.29 e
4	SAMSOY	4.23 ef	13	SF-2	4.60 bc
5	SF-10	4.10 f	14	SF-7	4.56 c
6	SF-1	3.97 g	15	SF-8	4.53 cd
7	ATAEM-7	4.72 ab	16	SF-15	4.60 bc
8	SF-9	4.67 b	17	SF-12	4.61 bc
9	SF-5	4.44 d	18	SF-4	4.05 fg
Minimum - Maximum		2.78-4.78			
Genotip Ortalaması		4.31			
Çeşit Ortalaması		4.55			
Genel Ortalama		4.35			
Önemlilik		**			
CV (%)		6.74			

Diyarbakır Bölgesi ikinci ürün koşullarında 10 soya fasulyesi çeşidinin kullanıldığı çalışmada, çeşitler arasında bakla boyu ve bakladaki tohum sayısı hariç diğer karakterler bakımından önemli düzeyde farklılıklar göröldüğü İşler ve ark. (1997) tarafından ifade edilmiş olup bu agronomik özellik üzerine yürütölen diğer çalışmalarda Çetin ve Öztürk (2012) 4.10-4.50 cm, Sabancı (2013) 4.08-4.60 cm, Karabulut (2018) 3.44-4.14 cm, Demirel (2020) 3.81-4.63 cm ve Gümüş (2020) 4.43-16.60 cm değerlerine ulaşmışlardır. Yürütölen çalışmada bakla boyuna ait belirlenen değer aralığının (2.78-4.78 cm), bu agronomik özellik üzerine yürütölen diğer araştırmacıların buldukları değerlerin (3.44-16.60 cm) aralığında yer aldığı ve diğer yürütölmüş çalışmalarla paralellik gösterdiği görölmüştür.

3.8. Bakla Eni (cm)

Çalışmada yer alan 18 adet genotip/çeşidin ortalama bakla eni değerleri Tablo 12’de verilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda incelenen özelliklerden olan bakla eni açısından genotip ve çeşitler arasında önemli derecede ($P<0.05$) istatistiki farkın bulunduğı belirlenmiştir. Çalışmada yer

alan soya fasulyesi çeşitleri bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bakla eni 1.07 cm ile Ataem-7 çeşidinde görülürken bu çeşidi 0.98 cm ile Arısoy çeşidi izlemiş olup bu çeşitlerin sırasıyla “a ve d” grubunda yer aldıkları buna karşın Samsoy çeşidinin ise 0.88 cm bakla eni değeri ile çeşitler içinde son sırada yer aldığı ve “fg” grubunda bulunduğu ortaya konulmuş olup tüm çeşitlerin ortalama bakla eni değerinin ise 0.98 cm olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Yürütülen çalışmada yer alan soya fasulyesi genotipleri bakla eni bakımından incelendiğinde en yüksek bakla eni değeri 1.04 cm ile SF-9 ve SF-8 nolu genotiplerde görülürken bu genotipleri 1.01 cm ile SF-2 ve 0.96 cm ile SF-12 nolu genotipler izlemiş olup bu 4 genotipin sırasıyla “b, c ve de” gruplarında yer aldıkları saptanmıştır. Tüm genotipler içinde bakla eni değeri açısından SF-6 nolu genotipi 0.52 cm ve “l” grubu ile son sırada yer alırken ortalama bakla eni değerinin soya fasulyesi genotipleri adına 0.86 cm olarak ölçüldüğü ortaya konulmuştur.

Tablo 12. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait bakla eni (cm) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BE	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BE
1	SF-3	0.69 j	10	SF-14	0.75 ı
2	ARISOY	0.98 d	11	SF-13	0.86 g
3	SF-6	0.52 l	12	SF-11	0.86 g
4	SAMSOY	0.88 fg	13	SF-2	1.01 c
5	SF-10	0.86 g	14	SF-7	0.95 e
6	SF-1	0.83 h	15	SF-8	1.04 b
7	ATAEM-7	1.07 a	16	SF-15	0.95 e
8	SF-9	1.04 b	17	SF-12	0.96 de
9	SF-5	0.65 k	18	SF-4	0.89 f
Minimum - Maximum		0.52-1.07			
Genotip Ortalaması		0.86			
Çeşit Ortalaması		0.98			
Genel Ortalama		0.88			
Önemlilik		*			
CV (%)		7.05			

Bu değer standard çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 0.88 cm değerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Karabulut (2018) 0.63-0.72 cm ve Demirel (2020) 0.71-0.82 cm değerlerine ulaşmışlardır. Yürütülen çalışmada bakla enine ait belirlenen değer aralığının (0.52.-1.07 cm), bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer araştırmacıların buldukları değerlerin (0.63-0.82 cm) aralığında yer aldığı ve diğer yürütülmüş çalışmalarla paralellik gösterdiği görülmüştür.

3.9. Bakla Ağırlığı (g)

Çalışmada yer alan 18 adet genotip/çeşidin ortalama bakla ağırlığı değerleri Tablo 13’de verilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda incelenen özelliklerden olan bakla ağırlığı açısından genotip ve çeşitler arasında önemli derecede ($P<0.05$) istatistiki farkın bulunduğu belirlenmiştir. Çalışmada yer alan soya fasulyesi çeşitleri bakımından Tablo değerlendirildiğinde bloklar ortalaması olarak en yüksek bakla ağırlığı 0.34 g ile Samsoy çeşidinde görülürken bu çeşidi 0.29 g ile Arısoy çeşidi izlemiş olup bu çeşitlerin sırasıyla “a ve b” grubunda yer aldıkları buna karşın Ataem-7 çeşidinin ise 0.23 g bakla ağırlığı değeri ile çeşitler içinde son sırada yer aldığı ve “g” grubunda bulunduğu ortaya konulmuş olup tüm çeşitlerin ortalama bakla ağırlığı değerinin ise 0.29 g olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Yürütülen çalışmada yer alan soya fasulyesi genotipleri bakla ağırlığı açısından incelendiğinde en yüksek bakla ağırlığı değeri 0.29 g ile SF-10 ve SF-8 nolu genotiplerde görülürken bu genotipleri 0.28 g ile SF-13 ve 0.27 g ile SF-9 nolu genotipler izlemiş olup bu 4 genotipin sırasıyla “b, c ve d” gruplarında yer aldıkları saptanmıştır. Tüm genotipler içinde bakla ağırlığı değeri açısından SF-6 nolu genotipi 0.17 g ve “k” grubu ile son sırada yer alırken ortalama bakla ağırlığı

değerinin soya fasulyesi genotipleri adına 0.24 g olarak ölçüldüğü ortaya konulmuştur. Bu değer standard çeşitler ile soya fasulyesi genotiplerinin tümünün ortalama değeri olan 0.25 g değerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Soya fasulyesi üzerine yürütülmüş olan bir çalışmada soya fasulyesinde tohum verimine en büyük katkıyı bakla ağırlığının yaptığı Atanda ve ark. (2014) tarafından belirlenmiş olup bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer çalışmalarda Demirel (2020) 0.36-1.44 g ve Gül (2023) 0.59-0.98 g değerlerine ulaşmışlardır. Yürütülen çalışmada bakla ağırlığına ait belirlenen değer aralığının (0.17-0.34 g), bu agronomik özellik üzerine yürütülen diğer araştırmacıların buldukları değerlerin (0.36-1.44 g) aralığında yer aldığı ve diğer yürütülmüş çalışmalarla paralellik gösterdiği görülmüştür.

Tablo 13. Denemede yer alan soya fasulyesi genotip/çeşitlere ait bakla ağırlığı (g) değerleri ve istatistiki gruplandırmaları

Sıra No	Genotip/Çeşitler	BA	Sıra No	Genotip/Çeşitler	BA
1	SF-3	0.25 f	10	SF-14	0.26 e
2	ARISOY	0.29 b	11	SF-13	0.28 c
3	SF-6	0.17 k	12	SF-11	0.27 d
4	SAMSOY	0.34 a	13	SF-2	0.23 g
5	SF-10	0.29 b	14	SF-7	0.22 h
6	SF-1	0.23 g	15	SF-8	0.29 b
7	ATAEM-7	0.23 g	16	SF-15	0.20 ı
8	SF-9	0.27 d	17	SF-12	0.26 e
9	SF-5	0.22 h	18	SF-4	0.19 j
Minimum - Maximum		0.17-0.34			
Genotip Ortalaması		0.24			
Çeşit Ortalaması		0.29			
Genel Ortalama		0.25			
Önemlilik		*			
CV (%)		7.23			

4. SONUÇ

Sivas ekolojik koşullarında bazı soya fasulyesi genotip/çeşitlerinin değişen iklim koşulları altında verim ve verim öğelerinin performanslarının ortaya konulması amacıyla yürütülen çalışma sonuçlarına göre SF-3, SF-6, SF-10, Arısoy ve Samsoy soya fasulyesi genotip/çeşitlerin Sivas ekolojik koşulları için uygun genotip/çeşit oldukları ancak bu tür iklimsel çalışmalarda elde edilecek sonuçlarla daha güvenilir önerilerde bulunulabilmesi için araştırmanın bölge ekolojik koşullarında en az 2 yıl daha tekrarlanmasının daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

Sonuç olarak ülkemizde soya fasulyesinde genetik tabanın dar olması nedeniyle ve özellikle abiyotik faktörlere karşı yürütülecek ıslah çalışmalarında seleksiyonları gerçekleştirilen bu genotiplerden ümitvar olanların yapacağımız çalışmalara kaynak teşkil edecek düzeyde bulunduğu kanısındayız.

KAYNAKÇA

- Acar, F., 2015. Doğu Geçit Bölgesinde Bazı Soya (*Glycine max.* L) Çeşitlerinin Verim ve Verim Unsurlarının Belirlenmesi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bingöl, Türkiye.
- Acar, M., Dok, M., Gizlenci, Ş., Özçelik, H., 2007. Karadeniz Sahil ve İç Geçit Bölgelerde Soya Üretiminin Geliştirilme İmkânları. 1. Ulusal Yağlı Tohumlu Bitkiler ve Biyodizel Sempozyumu, Poster Bildiriler Kitabı, Samsun, 79-84 s.
- Altınyüzük, H., Öztürk, Ö., 2017. Soya Çeşitlerinin Çukurova Koşullarında II. Ürün Olarak Verim ve Kalite Özelliklerinin İncelenmesi. Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 31 (3): 101-110 s.

- Andırman, M., Karaaslan, D., Öztürk, F., Erdem, V. E., Ayışığı, S., 2019. Farklı Soya Fasulyesi Çeşitlerinin Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Verim ve Verim Özelliklerinin Belirlenmesi. Türkiye 13. Ulusal, 1. Uluslararası Tarla Bitkileri Kongresi, 01-04 Kasım, Antalya, Türkiye.
- Arioğlu, H.H., Zaimoğlu, B., Çalışkan, S., Söğüt, T., Güllüoğlu, L., Arslan, M., Çalışkan, E.M., Uncu, A.H., 2005. İkinci Ürün Koşullarına Uygun Soya (*Glycine max* L.) Çeşit İslahı Üzerinde Araştırmalar. Türkiye VI. Tarla Bitkileri Kongresi, Cilt II, 1107-1112 s, Antalya.
- Arslan, M., Arioğlu, H., 2003. Amik Ovasında İkinci Ürün Olarak Yetiştirilebilecek Soya (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Tespiti ve Uygun Bitki Tipinin Belirlenmesi. Ç.Ü.Z.F. Dergisi, 18 (3): 39-46 s.
- Arslan, D., 2007. Soyada (*Glycine max* L.) Ana ve İkinci Ürün Ekim Zamanlarında Yapılan Seleksiyonların Verim ve Verim Öğelerine Etkileri. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 60 s.
- Atanda, S., Afe, A.I., Aduloju, M.O., Ogundare, S.K., 2014. Evaluation of Some Morphological and Yield Component Traits Relationship to Soybean Seed Yield. Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, 4 (25): 55-58 p.
- Bakal, H., Arioğlu, H., Güllüoğlu, L., Kurt, C., Onat, B., 2016. İkinci Ürün Koşullarında Yetiştirilen Bazı Soya Çeşitlerinin Önemli Agronomik ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 25 (Özel sayı-2), 125-130 s.
- Bakoğlu, A., Ayçiçek, M., 2005. Elazığ Şartlarında Soya Fasulyesinin (*Glycine max* L.) Tarımsal Özellikleri ve Tohum Verimi. F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17 (1): 52-58 s.
- Barış, M., 2016. Diyarbakır Ekolojik Koşullarında Farklı Ekim Zamanı Uygulamalarının Bazı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinde Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 114 s.
- Bayraktar, N., Eser, V., Mert, M., 2007. Orta-Karadeniz Koşullarında, Bazı Soya (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Verim ve Verim Öğelerinin Belirlenmesi. Türkiye 7. Tarla Bitkileri Kongresi, Bildiri Kitabı Cilt II. 502-505. 25-27 Haziran, Erzurum.
- Beyyavaş, V., Haliloğlu, H., Yılmaz, A., 2007. İkinci Ürün Soya Tarımında Farklı Ekim Zamanlarının Verim ve Verim Unsurlarına Etkisi. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 11 (3/4): 23-32 s.
- Boydak, E., 1997. Harran Ovası Şartlarında Bazı Soya (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin En Uygun Ekim Zamanının Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Şanlıurfa, 83 s.
- Boydak, E., Kayantaş, B., Acar, F., Fırat, R., 2018. Bazı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Yüksek Rakımlarda Verim ve Verim Unsurlarının Belirlenmesi. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 22 (4): 544-550 s.
- Cinsoy, A.S., Tuğay, E., Atıkyılmaz, N., Eşme, S., 2005. Ana ve İkinci Ürün Soya Tarımında Verim ve Bazı Özellikler Üzerine Bir Araştırma. Türkiye VI. Tarla Bitkileri Kongresi, 8-11 Eylül, Antalya, Türkiye.
- Çalışkan, S., Aytekin, R.I., 2017. Determination of Yield and Quality Performances of Soybean Cultivars in Different Maturity Groups Under Main Crop Conditions of Niğde Region. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 5 (11): 1446-1453 s.
- Çarkçı, O., 1998. Bazı Soya Çeşitlerinin Göller Yöresinde Verim ve Verim Unsurlarının Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 45 s.
- Çelik, Ş., Akgül, A., Boydak, E., 2001. Harran Ovasında Denenen Bazı Soya Çeşitlerinin Tohum ve Yağ Bileşimi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 32 (4): 469-475 s.
- Çetin, S. H., Öztürk, Ö., 2012. Soyada Farklı Fosfor Dozlarının Verim ve Verim Unsurları Üzerine Etkisi. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, (1): 157-161 s.
- Çiller, S., 2025. Diyarbakır Ana ve İkinci Ürün Koşullarında Farklı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Verim Performanslarının Belirlenmesi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır, 70 s.
- Çopur, O., Demirel, U., Gür, M.A., Karakuş, M., 2005. Harran Ovası Koşullarında Bazı Soya (*Glycine max* L.) Genotiplerinin Verim ve Verim Öğelerinin Saptanması. GAP IV. Tarım Kongresi, Bildiri Kitabı 2. Cilt, 1586-1591s.

- Delice, H., 2017. Farklı Gelişme Dönemlerinde ve Sulama Düzeylerinde Bölünmüş Gübre Uygulamalarının Soya Bitkisinin Verim ve Kalite Özelliklerine Etkilerinin Belirlenmesi. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Demirel, F., 2020. Kahramanmaraş Şartlarında İkinci Ürün Olarak Yetiştirilebilecek Bazı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Verim ve Verim Unsurlarının Belirlenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>.
- Doğan, Y., Koyutürk, Ö., Aktaş, H., 2015. Mardin-Kızıltepe Ekolojik Koşullarında Ekim Zamanı Uygulamalarının Bazı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinde Verim ve Verim Öğeleri Üzerine Etkisi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi, 25 (3): 293-303 s.
- Dolapçı, F., 2012. Kahramanmaraş Koşullarında Bazı Soya (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Verim ve Verim Unsurlarının Belirlenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş.
- Ekinci, B., 2023. Batman Ekolojik Koşullarında Ana Ürün Olarak Yetiştirilen Bazı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı.
- Erbil, E., Gür, M.A., 2016. Harran Ovası Koşullarında II. Ürün Soya (*Glycine Max*. L.) Hat ve Çeşitlerinin Fizyolojik ve Morfolojik Parametreler Kullanarak Verim ve Kalite Kriterlerinin Belirlenmesi. 12. Tarla Bitkileri Kongresi, 12-15 Eylül, Kahramanmaraş.
- Eren, A., Kocatürk, M., Hoşgün, E.Z., Azcan, N., 2012. Bazı Soya Hat ve Çeşitlerinde Tohum Verimi, Yağ Protein ve Yağ asitleri İçerikleri ve Aralarındaki İlişkilerinin Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 7 (1): 1-9 s.
- Ertaş, A., 2017. Şanlıurfa Koşullarında Bazı Soya (*Glycine max*. L.) Çeşitlerinin Verim ve Verim Unsurlarının Belirlenmesi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Gaffaroğlu, S., 2008. Çukurova Bölgesi'nde Ana Ürün Koşullarında Bazı Soya Çeşit ve Hatlarının Verim ve Tarımsal Özelliklerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Gümüş, Z., 2020. Bazı Soya Çeşitlerinin Mardin İli Ekolojik Koşullarında İkinci Ürün Olarak Yetiştirilebilme Olanakları. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, 59 s.
- Güneş, A., 2006. İkinci Ürün Soya (*Glycine max* L.) Tarımında Farklı Azot Doz ve Uygulama Zamanlarının Verim ve Verim Unsurlarına Etkisi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa. 63 s.
- Güngör, H., Üstün, A., 2015. Konya Ekolojisine İki Farklı Sıra Aralığının Bazı Soya (*Glycine max* L.) Genotiplerinde Verim ve Bazı Verim Unsurlarına Etkisi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 32 (2): 100-106 s.
- İstemil, H., 2015. İkinci Ürün Soya (*Glycine max* L.) Tarımında Farklı Sıra Arası ve Azot Dozlarının Verim ve Verim Unsurlarına Etkisi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- İşler, N., Söğüt, T., Çalışkan, M.E., 1997. Bazı Soya Çeşitlerinin Diyarbakır Bölgesi II. Ürün Koşullarındaki Önemli Tarımsal ve Bitkisel Özelliklerinin Belirlenmesi. MKÜ Ziraat Fak. Dergisi, 2 (2): 81-90 s.
- Karaaslan, D., 2011. Diyarbakır İkinci Ürün Koşullarında Bazı Soya Hatlarının Verim ve Kalite Kriterlerinin Belirlenmesi. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 15 (3): 37-44 s.
- Karabulut, A., 2018. Farklı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Eskişehir Ekolojik Koşullarında Bazı Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- Karasu, A., Öz, M., Göksoy, A.T., 2002. Bazı Soya Fasulyesi Çeşitlerinin (*Glycine max* L.) Bursa Koşullarına Adaptasyonu Konusunda Bir Çalışma. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 16 (2): 25-34 s.

- Kınacı, M., 2011. Çanakkale Koşullarında Soya Fasulyesi Çeşitlerinin Verim ve Bazı Kalite Unsurlarının Belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Kolay, B., 2007. 2. Ürün Soya Tarımında Farklı Toprak İşleme Yöntemlerinin Verim Toprak Özelliklerine Etkisi. Toprak Anabilim Dalı, Proje No 672, Şanlıurfa.
- Malik, M.F.A., Ashraf, M., Qureshi, A.S., Khan, M.R., 2011. Investigation and Comparison of Some Morphological Traits of the Soybean Populations Using Cluster Analysis. Pakistan Journal of Botany, 43(2): 1249- 1255 p.
- Mert, M., 2015. Ana Ürün Koşullarında Bazı Soya Hat ve Çeşitlerinin Aksaray Bölgesine Adaptasyonu Üzerine Çalışmalar. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 62 s.
- Oba, M., 1996. Çukurova Bölgesinde İkinci Ürün Olarak Yetiştirilen Soya (*Glycine max* L.) Bitkisinde Farklı Zamanlarda ve Oranlarda Meydana Gelen Mekanik Zararın Tohum Verimine Etkisinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 55 s.
- Özüstün, A., 2022. Farklı Ekolojik Koşullarda Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Aydın, Türkiye.
- Sabancı, İ., 2013. Mısır-Soya Birlikte Üretiminde Farklı Ekim Sistemlerinin Verim ve Bazı Agronomik Karakterlere Etkisi. Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Doktora Tezi, 123 s.
- Sarımehtetoğlu, O., 2006. Çukurova Bölgesi Çiftçi Koşullarında Yetiştirilen Soya Ürününde Bazı Önemli Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Sincik, M., Oral, H. S., Göksoy, T., Turan, Z. M., 2008. Farklı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Hatlarının Bursa Ekolojik Koşullarında Bazı Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 22 (1): 55-62 s.
- Söğüt, T., 2005. Aşılama ve Azotlu Gübre Uygulamasının Bazı Soya Çeşitlerinin Verim ve Verim Özelliklerine Etkisi. Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 18 (2): 213-218 s.
- Söğüt, T., Öztürk, F., Temiz, M.G., 2005. Farklı Olgunlaşma Grubuna Dahil Bazı Soya (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Ana ve İkinci Ürün Koşullarındaki Performanslarının Karşılaştırılması. Türkiye VI. Tarla Bitkileri Kongresi, 5-9 Eylül, Antalya, 1, 393-398.
- Şenyiğit, E., Sincik, M., Bayram, G., Demir, E., Dinç, A., Göksoy, A.T., 2015. İleri Generasyon Soya Hatlarının Bursa Ekolojik Koşullarında Bazı Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. 11 Tarla Bitkileri Kongresi, 7-10 Eylül, Çanakkale, Türkiye.
- Tanrıverdi, M., Yılmaz, A., Güvercin, R.Ş., 2000. Harran Ovası Şartlarında İkinci Ürün Olarak Yetiştirilebilecek Bazı Soya Çeşitlerinin Verim ve Tarımsal Özelliklerinin Belirlenmesi. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, Cilt: 4, Sayı 1-2 s.
- Tayyar, Ş., Gül, M.K., 2007. Bazı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Genotiplerinin Ana Ürün Olarak Biga Şartlarındaki Performansları. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi, 17 (2): 55-59 s.
- Ünal, İ., 2007. Melezleme yöntemiyle elde edilen soya (*Glycine max* L.) hatlarının bazı tarımsal özelliklerinin belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Konya, Türkiye.
- Yaver, S., Paşa, C., 2009. Tekirdağ Koşullarında Bazı Soya Fasulyesi Çeşitlerinin Verim Kriterleri Üzerine Bir Araştırma. Türkiye VIII. Tarla Bitkileri Kongresi, 19-22 Ekim, Hatay.
- Yetim, S., 2008. GAP Bölgesi Harran Ovası Koşullarında Azot ve Demir Gübrelemesinin İkinci Ürün Soya (*Glycine max* L.) Bitkisinin Verimine ve Bazı Kalite Kriterlerine Etkisi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara, 173 s.
- Yıldırım, A., 2017. Ege Bölgesinde İkinci Ürün Koşullarında Bazı Soya Çeşit ve Hatlarının Verim ve Agronomik Özelliklerinin Belirlenmesi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 83 s.

- Yılmaz, H.A., Efe, L., 1998. Bazı Soya (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Kahramanmaraş Koşullarında II. Ürün Olarak Yetiştirilebilme Olanakları. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 22: 135-142 s.
- Zaimoğlu, B., Arıoğlu, H., Çürük, U., Söğüt, T., Bek, D., Güllüoğlu, L., 2005. İkinci Ürün Koşullarında Yetiştirilecek Soya (*Glycine Max*. L.) Çeşit ve Hatlar ile Bunların Önemli Tarımsal ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Türkiye VI. Tarla Bitkileri Kongresi, 403-410 s, Antalya.

**BAZI SOYA FASULYESİ GENOTİPLERİNDE VERİM ÖĞELERİ ARASINDAKİ
İLİŞKİLERİN KORELASYON ANALİZİ İLE ORTAYA KONULMASI**

TOLGA KARAKÖY

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bitki Koruma Bölümü, Sivas-Türkiye
tkarakoy@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0002-5428-1907

YETER ÇİLESİZ

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas-Türkiye
ycilesiz@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0002-4313-352X

ÖMER SÖZEN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas-Türkiye
omers@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0001-5528-7887

ÖZET

Sivas ili ekolojik koşullarında bazı soya fasulyesi genotip/çeşitlerinde verim ile verim öğeleri arasındaki ilişki düzeylerinin ve bu ilişkilerin olumlu/olumsuz yönlerinin belirlenmesi amacıyla yürütülen bu çalışma, 2025 yılında soya fasulyesi vejetasyon dönemi boyunca gerçekleştirilmiştir. Yürütülen bu çalışmada 15 adet soya fasulyesi genotipi ile 3 adet soya fasulyesi çeşidi (Arisoy, Ataem-7 ve Samsoy) kullanılmıştır. Korelasyon analiz sonuçlarının belirlenmesi amacıyla fenolojik ve agronomik özellikler olarak %50 çiçeklenme gün süresi, %50 bakla bağlama gün süresi, vejetasyon süresi, bitki boyu, ilk bakla yüksekliği, bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı, yüz tane ağırlığı ve dekara tane verimi incelenmiştir. Soya fasulyesi genotip/çeşitleri üzerinden yürütülen araştırmada korelasyon analizi ile elde edilen sonuçlara göre dekara tane verimi ile bitki boyu, ilk bakla yüksekliği, bitkide bakla sayısı ve 100 tane ağırlığı arasında pozitif ve çok önemli ilişkiler ortaya konulmuştur. Bunun yanında yüz tane ağırlığı ile bitki boyu ve ilk bakla yüksekliği arasında çok önemli ve pozitif ilişkiler belirlenmiştir. Sonuç olarak korelasyon analizi sonucunda dekara tane veriminin yanında bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı ve yüz tane ağırlığının seleksiyonda önemli agronomik parametreler olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sivas, soya fasulyesi, genotip, çeşit, korelasyon analizi

**REVEALING THE RELATIONSHIPS AMONG YIELD COMPONENTS IN SOME
SOYBEAN GENOTYPES THROUGH CORRELATION ANALYSIS**

ABSTRACT

This study was conducted under the ecological conditions of Sivas province to determine the degree of relationships between yield and yield components, as well as the positive and negative directions of these relationships in some soybean genotypes/varieties, and was carried out throughout the soybean growing season in 2025. In this study, a total of 15 soybean genotypes and 3 soybean cultivars (Arisoy, Ataem-7, and Samsoy) were used. To determine the results of the correlation analysis, the following phenological and agronomic traits were evaluated; days to 50% flowering, days to 50% pod setting, vegetation period, plant height, first pod height, number of pods per plant, number of seeds per pod, hundred-seed weight, and seed yield per decare. According to the results of the correlation analysis conducted on soybean genotypes/cultivars, highly significant and positive relationships were identified between grain yield per decare and plant height, first pod height, number of pods per plant, and hundred-seed weight. In addition, highly significant and positive relationships were determined between hundred-seed weight and both plant height and first pod height. In conclusion, the correlation analysis revealed that, in addition to grain yield per decare, the number of pods per plant, number of seeds per pod, and hundred-seed weight are important agronomic parameters for selection.

Keywords: Sivas, Soybean, Genotype, Variety, Correlation Analysis

1. GİRİŞ

Bir baklagil bitkisi olan soya fasulyesi (*Glycine max* L. Merr.) Fabaceae familyasına ait olup tek yıllık ve yazlık (kısa gün) kültür bitkisidir. Tanelerindeki yüksek yağ içeriği soya fasulyesini yağlı tohumlu bitkiler sınıfına sokmaktadır (Çiller, 2025). Kısa gün bitkisi olmasının yanında yetiştirme ve vejetasyon koşulları bir baklagil bitkisi olan kuru fasulyeye benzemektedir (Bozkurt, 1988).

Bünyesinde yaklaşık %18-24 yağ ve %36-40 protein oranı bulundurmasından dolayı soya fasulyesi özellikle gıda sanayisinde ve hayvan beslenmesinde yoğun biçimde yer almaktadır (Kolsarıcı ve ark., 2015). Bunun yanında sahip olduğu mineraller (kalsiyum, demir ve çinko) ve vitaminlerden (retinol, tiyamin, riboflavin, askorbik asit, kalsiferol ve tokoferol) dolayı, insan ve hayvanlar için önemli bir besin kaynağı haline gelmiştir (Arioğlu, 2007).

Tohum renginin çeşitlilik göstermesinin (sarı, siyah, yeşil, kahverengi ve benekli) yanında Dünya soya fasulyesi üretiminde özellikle koyu renkli tohumlar açık renklilere göre daha fazla tercih edilmekte olup ancak koyu renkli tohumlar sert yapıya sahiptirler (Liu ve ark., 2016).

Soya fasulyesi tohumunun bünyesinde bulunan E vitaminin, Parkinson ve Alzaymer gibi hastalıkları önleyiciliğinin yanında buna bağlı olarak yaşlanmayı da geciktirdiği Arioğlu (2007) tarafından ifade edilmektedir. Ayrıca yine tohumun bünyesinde bulunan lanolinin ve linoleik yağ asitlerinin oluşabilecek kalp rahatsızlıklarını azalttığı da ortaya konulmuştur (Bek, 2002). Tanelerinde bulunan yüksek protein içeriği diyetlerde kullanılmasını teşvik etmesinin yanında (Kınacı, 2011) yağı çıkartılan küspenin de hayvan beslemede iyi bir protein kaynağı olduğu da Wilcox ve Guodong (1997) tarafından belirtilmiştir. Ayrıca tohumunun sanayide işlenmesinden dolayı elde edilen biyodizel araçlarda katkı verecek şekilde yakıt olarak da kullanılabilir (Kinney ve Clemente, 2004).

Anavatanının Uzakdoğu ülkeleri olduğu tahmine dilen soya fasulyesinin kültüre alınmasının yaklaşık 4.000 yıl öncesine kadar dayandığı ön görülmektedir (Kınacı, 2011). İnsan ve hayvan beslenmesi amacıyla 11 ve 12. yüzyılda Uzak doğu ülkelerinde yetiştirilmeye başlanmış olan soya fasulyesi daha sonraki yıllarda Güney Asya ülkelerine (Vietnam, Filipinler, Tayland, Japonya, Nepal ve Hindistan) götürülerek buralarda da tarımsal faaliyetlerde yer almaya başlamış olup ancak Avrupa’da yetiştiriciliğe başlanmasının 17. Yüzyılı bulduğu tahmin edilmektedir (Kınacı, 2011).

Tek yıllık bir bitki olan soya fasulyesi 1-1.5 m boylanmasının yanında önemli bir bitkidir. Çiçekleri mor ya da sarı renkte olup yaprakları oval şeklinde ve 3 yaprakçıklı yaprağa benzemektedir. Soya fasulyesinin hilum rengi siyah olup tohumları küre şeklindedir. Kazık köklü yapıya sahip olan soyanın kökleri yaklaşık 60-70 cm derinliğe inebilmektedir. Köklerinde bulunan bakteriler sayesinde havada bulunan serbest azot toprağa bağlanabilmektedir. 10-15 boğumdan oluşan sapları çeşitlere göre değişmekle birlikte üzeri sık tüylerle kaplı dik ve sert bir yapıya sahiptir. Çeşit ve ekim zamanına bağlı olarak farklı şekilde dallanma özelliği gösteren soyanın geççi çeşitlerinde boylanma ve dallanma fazla olurken yapraklanma fazla, erkenci çeşitlerinde ise boylanma, yapraklanma ve dallanma az olmaktadır. 500-550 mm ortalama yağış isteği olan soya fasulyesi genellikle Mayıs ve Eylül ayları arasında yetismekte olup ortalama sıcaklık isteği 25 °C civarındadır. Soya fasulyesi sıcaklığı seven bir bitki olup tropik ve subtropik iklimin hâkim olduğu yerlerde iyi gelişmektedir. Toplam sıcaklık isteği gelişme dönemi boyunca 2500-3000 °C’dir. Soya tohumlarının çimlenebilmesi için sıcaklığın en az +8 °C olması gerekmektedir olup sıfır derecenin altında değerlerde soya fasulyesi donma özelliği gösterebilmektedir. Aşırı kumlu topraklar ile drenajı iyi olmayan topraklarda soya fasulyesi iyi bir gelişim gösterememektedir (Anonim, 2019).

Dünya soya fasulyesi ekim alanı 143.175.353 ha olup bunun karşılığında 397.671.688 ton üretim gerçekleştirilmiştir. Dünya ülkeleri içinde Brezilya 144.473.768 ton üretimi ile ilk sırada yer almakta olup bu ülkeyi 118.836.440 ton ile ABD ve 48.213.207 ton ile Arjantin izlemektedir. Brezilya, %36.2’lik üretim oranıyla dünya soya üretiminde lider konumundadır. Brezilya ve ABD’nin son yıllarda dünya soya üretiminde söz sahibi ülkeler olduğu görülmektedir (FAO, 2024).

Ülkemizde ise soya fasulyesi ekim alanı 43.712 ha olup bunun karşılığında 180.000 ton üretim gerçekleştirilmiştir. Soya fasulyesi, sulama olanaklarının gelişmesiyle birlikte neredeyse her bölgede yetismekte olup sadece Doğu Anadolu Bölgesi’nde iklim koşulları ve yer şekilleri sebebiyle

yetişmemektedir. Soya fasulyesi ekim alanlarında Adana birinci sırada yer alırken, Mersin ikinci sırada, Kahramanmaraş ise üçüncü sırada yerini almıştır (TUIK, 2024).

İki değişken arasında ortaya konulan ilişkinin hem derecesini/şiddetini hem de pozitif/negatif yönünü belirlemek üzere kullanılan istatistik yöntemlerden biriside korelasyon analizidir. Korelasyon analizinde yer alan iki değişkenin bağımlı veya bağımsız olmasına dikkat edilmez. Hangi korelasyon katsayısının kullanılacağı; değişkenlerin hangi ölçek düzeyinde ölçüldüğüne, değişkenlerin sürekli veya süreksiz olmalarına; verilerin doğrusal olup olmamasına göre değişmektedir. Pearson korelasyon katsayısı, Canonical korelasyon katsayısı, kısmi korelasyon katsayısı, değişik şekillerde hesaplanan ve değişik amaçlar için kullanılan korelasyon katsayıları olup bunlardan Pearson korelasyon katsayısı, r ile gösterilir. Korelasyon katsayısı, -1 ile +1 arasında değişen değerlere ($-1 \leq r \leq +1$) sahip olup ilişkinin olmadığı durumda 0, tam ve kuvvetli bir ilişki varsa 1, ters yönlü ve tam bir ilişki varsa -1 değerini almaktadır.

Bu çalışmanın amacı Sivas ekolojik koşullarında soya fasulyesi genotiplerinin fenolojik/agronomik özellikleri arasındaki ilişkilerin yönü ve önemliliklerinin belirlenmesidir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. MATERYAL

Bu araştırmanın tarla denemeleri 2025 yılında bir yıl süreyle soya fasulyesi vejetasyonu döneminde Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'ne bağlı AR-GE Tarımsal Araştırma Merkezi'nin ıslah amaçlı deneme arazisinde yürütülmüştür. Araştırma yerinin denizden yüksekliği 1285 m olup 39.72072 enlem ve 36.91786 boylam dereceleri arasında yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Araştırmanın yürütüldüğü deneme arazisi

Farklı yıllarda yürütülen soya fasulyesi ebeveynlerinden oluşturulan melezleme ıslah programları kapsamında elde edilen tek bitkilerden seçilen ve tarla koşullarında gerçekleştirilen seleksiyon sonucunda ileri düzeye kadar getirilmiş 15 adet soya fasulyesi genotipi ile kıyaslama yapmak üzere 3 adet soya fasulyesi (Arisoy, Ataem-7 ve Samsoy) çeşidi araştırmanın materyali olarak belirlenmiştir (Tablo 1 ve 2).

Tablo 1. Araştırmada materyal olarak kullanılan soya fasulyesi çeşitleri

ÇEŞİTLER	ARISOY	ATAEM-7	SAMSOY
Tescil Yılı	2006	2006	2019
Çeşit Sahibi Kuruluş	Çukurova Üniversitesi (Adana)	BATEM (Antalya)	KTAE (Samsun)
Bitki Boyu (cm)	95-125	100-120	115
Büyüme Şekli	yarı dik	yarı dik	yarı dik
100 Tane Ağırlığı (g)	16-19	15-16	20.2
Bitkide Bakla Sayısı (adet)	75	70-90	90
Verim (kg/da)	500-600	350-450	435
Tohum Şekli	yuvarlak	yuvarlak	yuvarlak
Tohum Rengi	açık kahverengi	açık kahverengi	açık kahverengi

Tablo 2. Araştırmada materyal olarak kullanılan soya fasulyesi genotipleri

Sıra No	Soya Fasulyesi Genotipleri
1	SF-1
2	SF-2
3	SF-3
4	SF-4
5	SF-5
6	SF-6
7	SF-7
8	SF-8
9	SF-9
10	SF-10
11	SF-11
12	SF-12
13	SF-13
14	SF-14
15	SF-15

Araştırma Yerinin İklim Özellikleri

Denemenin kurulduğu lokasyonun soya fasulyesi vejetasyonu dönemine ait uzun yıllar ortalaması (2000-2024 yılları arası) ile çalışmanın gerçekleştirildiği 2025 yılına ait meteorolojik veriler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Sivas ilinin 2025 yılı ile uzun yıllara ait iklim verileri

Aylar	Ortalama Sıcaklık (°C)		Toplam Yağış (mm)		Ortalama Nispi Nem (%)	
	2025	Uzun Yıllar	2025	Uzun Yıllar	2025	Uzun Yıllar
Mayıs	13.0	13.5	66.3	52.4	62.7	60.9
Haziran	18.8	17.3	15.4	43.4	60.1	58.7
Temmuz	22.1	20.0	2.4	6.2	55.8	53.9
Ağustos	24.2	20.2	3.1	4.5	57.2	53.3
Eylül	18.6	16.2	20.6	16.6	53.6	55.6
Ekim	16.8	14.4	18.2	21.9	55.1	56.2
Toplam			126.0	146.0		
Ortalama	18.91	16.93			57.42	56.43

Tablo değerlendirildiğinde uzun yıllara ait ortalama değerler ile denemelerin kurulduğu 2025 yılına ait aylık sıcaklık ortalamaları arasında aylar kapsamında büyük bir farkın olmadığı görülmektedir. Uzun yıllar ortalaması, en düşük aylık sıcaklık ortalamasının 13.5 °C ile Mayıs ayında, aylık en yüksek sıcaklık ortalamasının ise 20.2 °C ile Ağustos ayında olduğu görülmüştür. 2025 yılına ait deneme periyotlarındaki bu değerler 13.0 °C ile Mayıs ve 24.2 °C ile Ağustos aylarında sıralanmıştır. Bunun yanında 2025 yılı aylık toplam yağış değerlerinde Mayıs ve Eylül ayları aylık yağış toplamalarının uzun yıllardan aynı aylara göre yüksekte kaldığı geriye kalan ayların ise uzun yıllar ortalamasının altında seyrettiği, aylık ortalama nisbi nem verileri gözlemlendiğinde ise uzun yıllar ortalama verileri ile deneme yılının birbirine yakın değerler elde ettikleri görülmüştür.

Toprak Özellikleri

Çalışmanın bir yıl olarak yürütüldüğü deneme parselinin toprak ögeleri incelendiğinde deneme parselinin toprağının alkali seviyesinin hafif (7.25), organik madde içeriğinin orta (%1.65), alınabilir fosfor (3.50) ve potasyum düzeyleri (92.45) bakımından orta, tuz seviyesinin tuzlu (%0.31) ve kireç içeriğinin ise kireçli (18.8) olduğu ortaya konulmuştur (Tablo 4).

Tablo 4. Deneme yeri toprağına ait fiziksel ve kimyasal özellikleri

Yıllar	Tekstür	pH	Kireç (% CaCO ₃)	Toplam Tuz (%)	Fosfor (P ₂ O ₅)	Potasyu m (K ₂ O)	Organik Madde (%)
2025	Siltli killi tın	7.25	18.8	0.31	3.50	92.45	1.65

2.2. METOT

Araştırmanın yürütüldüğü deneme arazisinin ön bitkisi şeker pancarı olup şeker pancarının hasadı sonrasında pullukla sürülerek kış yağmurlarına bırakılmıştır. Ekim öncesinde deneme arazisine önce diskaro sokularak yabancı otlardan arındırılmış ardından rotovator ile ekim için hazır hale getirilmiştir. Araştırma, Tesadüf Blokları Deneme Deseninde 3 tekrerrürlü olacak şekilde kurulmuş olup parseller 5.0 m x 2.8 m= 14.0 m² ebatlarına sahiptir. 15 adet soya fasulyesi genotipi ile 3 adet standart çeşit olmak üzere toplam 18 adet genotipin parsellere dağıtımı tesadüfi olarak yapılmıştır. Denemenin ekimleri 22 Mayıs 2025 tarihinde tavlı toprağına gerçekleştirilmiştir. Ekimler 70 cm sıra aralığında 10 cm sıra üzerinde, her bir sıraya 50 adet tohum düşecek şekilde markörle açılan sıralara 3-5 cm derinliğe elle yapılmıştır. Her parsel 4 sıradan oluşmuştur. Yabancı otlarla mücadele etmek üzere ekim sonrası çıkış öncesi yabancı ot ilacı uygulanmış ve vejetasyon süresince 2 sefer çapa yapılmıştır. Denemenin sulama ihtiyacını karşılamak üzere yağmurlama sulama sistemi kurulmuş ve tüm vejetasyon boyunca ihtiyaç duyulduğu dönemlerde sulama (8 adet) gerçekleştirilmiştir. Ekim öncesi hazırlanan parsellere dekara 20 kg DAP (%18 N, %46 P₂O₅) gübresi (3.6 kg/da N ve 9.2 kg/da P) ve daha sonra birinci sudan öncede 20 kg/da %33'lük amonyum nitrat uygulanmıştır. Araştırmanın yürütüldüğü deneme alanındaki genotiplerin hasadı hasat olgunluğına ulaştıkları dönem aralığı olan 26-28 Ekim tarihleri arasında el ile yapılmıştır. Dörder sıradan oluşan her parselin her iki yanından birer sıra ile parsel başı ve sonundan 50 cm'lik kısımlar kenar tesiri olarak atılmak suretiyle 4.0 m x 1.4 m= 5.6 m²'lik alanda yer alan bitkiler hasat edilmiştir. Her bir parselden hasat edilen bitkiler ayrı ayrı çuvalara konulup etiketlenerek hasat-harman sonrası gerekli ölçümler ve analizler yapılmak üzere Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümüne ait harman odasına getirilmiştir.

Verilerin Değerlendirilmesi

Araştırma sonucunda elde edilen verilerden değişkenlerin aralarındaki doğrusal ilişkiler için korelasyon analizi yapılmış olup bu işlemler JUMP 7.01 istatistik paket programında gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Korelasyon Analizi

Sivas ekolojik koşulları altında yürütülen çalışmada 18 adet soya fasulyesi genotipinde ele alınan 9 adet fenolojik ve agronomik özellik arasındaki korelasyon katsayıları belirlenerek fenolojik ve agronomik özellikler arası ilişkilerin yönü ve önemlilikleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo incelendiğinde %50 çiçeklenme gün süresi ile %50 bakla bağlama gün süresi ($r= 0.388^{**}$), vejetasyon süresi ($r= 0.301^{**}$), bitkide bakla sayısı ($r= 0.381^{**}$) ve bakla tane sayısı ($r= 0.290^{**}$) arasında çok önemli ve olumlu; dekara tane verimi ($r= 0.202^{*}$) ile önemli ve olumlu ilişkiler ortaya konulurken ilk bakla yüksekliği ($r= -0.214^{**}$) ve yüz tane ağırlığı ($r= -0.347^{**}$) ile çok önemli ve olumsuz; bitki boyu ($r= -0.128^{*}$) ile ise önemli fakat olumsuz ilişkiler belirlenmiştir.

Tablo 5. Sivas ekolojik koşullarında bazı soya fasulyesi genotiplerinde incelenen fenolojik ve agronomik özellikler arası ilişkiler ve korelasyon katsayıları

İncelenen Özellikler	%50ÇGS	%50BBGS	VS	BB	İBY	BBS	BTS	YTA	DTV
%50ÇGS	-	0.266**	0.301**	-0.128*	-0.214**	0.381**	0.290**	-0.347**	0.202*
%50BBGS		-	0.255*	-0.161**	-0.278*	0.377**	0.318*	-0.309*	0.227
VS			-	0.163	0.233*	0.211**	0.206*	-0.362	0.425*
BB				-	0.488**	-0.402*	0.081	0.345**	0.472**
İBY					-	-0.370**	0.155*	0.316**	0.403**
BBS						-	0.509**	-0.398**	0.437**
BTS							-	-0.362**	0.409*
YTA								-	0.239**
%50 ÇGS: %50 çiçeklenme gün süresi			BBS: Bitkide Bakla Sayısı						
%50 BBGS: %50 bakla bağlama gün süresi			BTS: Baklada Tane Sayısı						
VS: Vejetasyon Süresi			YTA: Yüz Tane Ağırlığı						
BB: Bitki Boyu			DTV: Dekara Tane Verimi						
İBY: İlk Bakla Yüksekliği									

%50 bakla bağlama gün süresi ile bitkide bakla sayısı ($r = 0.377^{**}$) arasında çok önemli ve olumlu; vejetasyon süresi ($r = 0.255^{*}$) ve baklada tane sayısı ($r = 0.318^{*}$) ile önemli ve olumlu; dekara tane verimi ($r = 0.227$) ile önemsiz ve olumlu ilişkiler tespit edilirken bitki boyu ($r = -0.161^{**}$) ile çok önemli fakat olumsuz; ilk bakla yüksekliği ($r = -0.278^{*}$) ve yüz tane ağırlığı ($r = -0.309^{*}$) ile ise önemli ve olumsuz ilişkiler saptanmıştır.

Vejetasyon süresi ile bitkide bakla sayısı ($r = 0.211^{**}$) arasında çok önemli ve olumlu; ilk bakla yüksekliği ($r = 0.233^{*}$), baklada tane sayısı ($r = 0.206^{*}$) ve dekara tane verimi ($r = 0.425^{*}$) ile önemli ve olumlu; bitki boyu ($r = 0.163$) ile ise önemsiz ve olumlu ilişkiler görülürken yüz tane ağırlığı ($r = -0.362$) ile ise önemsiz fakat olumsuz ilişkiler sergilenmiştir.

Bitki boyu ile ilk bakla yüksekliği ($r = 0.488^{**}$), yüz tane ağırlığı ($r = 0.345^{**}$) ve dekara tane verimi ($r = 0.472^{**}$) arasında çok önemli ve olumlu; baklada tane sayısı ($r = 0.081^{**}$) ile önemsiz ve olumlu ilişkiler belirlenirken; bitkide bakla sayısı ($r = -0.402^{*}$) ile ise önemli fakat olumsuz ilişkiler tespit edilmiştir.

İlk bakla yüksekliği ile yüz tane ağırlığı ($r = 0.316^{**}$) ve dekara tane verimi ($r = 0.403^{**}$) arasında çok önemli ve olumlu; baklada tane sayısı ($r = 0.155^{*}$) ile ise önemli ve olumlu ilişkiler ortaya konulurken bitkide bakla sayısı ($r = -0.370^{**}$) ile ise çok önemli fakat olumsuz ilişkiler saptanmıştır.

Bitkide bakla sayısı ile baklada tane sayısı ($r = 0.509^{**}$) ve dekara tane verimi ($r = 0.437^{**}$) arasında çok önemli ve olumlu ilişkiler görülürken yüz tane ağırlığı ($r = -0.398^{**}$) ile ise çok önemli fakat olumsuz ilişkiler belirlenmiştir.

Baklada tane sayısı ile yüz tane ağırlığı ($r = -0.362^{**}$) arasında ok önemli ve olumsuz; dekara tane verimi ($r = 0.409^{*}$) ile ise önemli ve olumlu ilişkiler belirlenmiştir. Bunun yanında yüz tane ağırlığı ile dekara tane verimi ($r = 0.239^{**}$) arasında ise çok önemli ve olumlu ilişkiler ortaya konulmuştur.

4. SONUÇ

Yürütülen araştırma ile soya fasulyesinde dekara tane verim üzerine etkili olabilecek özelliklerin değişim aralıkları ortaya konulmuştur. Soya fasulyesinde çeşit geliştirmek için yürütülecek ıslah aşamalarında seçimi yapılacak bitkilerde iklimsel faktörlerin de ele alınması temeldir. Soya fasulyesinde çeşit geliştirme çalışmalarında bitki boyu, bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı ve yüz tane ağırlığı öğelerinin dikkate alınmasının önemli olduğu görülmüştür. Bunun yanında bitki boyu, bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı, yüz tane ağırlığı ve dekara tane verimi gibi agronomik parametrelerin incelenmesinde gerek yüksek gerekse olumlu dolaylı etkilerinden dolayı göz önüne alınmasının önemli olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Anonim., 2019. Tarım ve Orman Bakanlığı, Yayın ve Haberleşme Dairesi Başkanlığı. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/ktae/Belgeler/brosurler/Soya>, Üretici Bilgilendirme Rehberi.
- Arioğlu, H.H., 2007. Yağ Bitkileri Yetiştirme ve Islahı Ders Kitapları Yayın No: A70, Çukurova Üniversitesi Ziraat fakültesi Ofset Atölyesi, 204, Adana.
- Bek, D., 2002. Çukurova Koşullarında Farklı Soya Genotiplerinin Adaptasyon ve Verim Potansiyellerinin Saptanması. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Bozkurt, S., 1988. Soya Tarımı ve Sorunlar (I). Soya Sempozyumu, 8 Kasım 1988, Adana.
- Çiller, S., 2025. Diyarbakır Ana ve İkinci Ürün Koşullarında Farklı Soya Fasulyesi (*Glycine max* L.) Çeşitlerinin Verim Performanslarının Belirlenmesi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır, 70 s.
- FAO., 2024. Gıda ve Tarım Örgütü. <http://www.fao.org/statistics> (Erişim Tarihi: 03.07.2026).
- Kinney, A.J., Clemente, T.E., 2004. Modifying soybean oil for enhanced performance in biodisel blends. Fuel Processing Technology, 1-11 s.
- Kınacı, M., 2011. Çanakkale Koşullarında Soya Fasulyesi Çeşitlerinin Verim ve Bazı Kalite Unsurlarının Belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Kolsarıcı, Ö., Kaya, M.D., Göksoy, A.T., Arioğlu, H., Kulan, E.G., Day, S., 2015. Yağlı Tohum Üretiminde Yeni Arayışlar. Türkiye Ziraat Mühendisliği VIII. Teknik Kongresi. Bildiriler (I): 401-425. 12-16 Ocak 2015, Ankara.
- Liu, Z., Li, H., Fan, X., Huang, W., Yang, J., Wen, Z., 2016. Phenotypic characterization and genetic dissection of nine agronomic traits in Tokachi nagaha and its derived cultivars in soybean. Plant Science, 256: 72-86.
- TÜİK., 2024. Türkiye İstatistik Kurumu. Bitkisel Üretim İstatistikleri (Erişim Tarihi: 03.07.2026).
- Wilcox, J.R., Guodong, Z., 1997. Relationships between seed yield and seed protein in determinate and indeterminate soybean populations. Crop Science, 37:3, 61-364.

**BAZI SOYA FASULYESİ GENOTİPLERİNDE VERİM ÖĞELERİ ARASINDAKİ
İLİŞKİLERİN PATH ANALİZİ İLE ORTAYA KONULMASI**

ÖMER SÖZEN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas-Türkiye
omers@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0001-5528-7887

TOLGA KARAKÖY

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bitki Koruma Bölümü, Sivas-Türkiye
tkarakoy@sivas.edu.tr
ORCID: 0000-0002-5428-1907

ÖZET

Özellikle gıda sanayisinde ve hayvan beslenmesinde yoğun biçimde kullanılan soya fasulyesi, bir baklagil ve yağ bitkisi olarak bilinmektedir. Zengin protein içeriği, vitaminler ve besin elementleri açısından gıda beslenmesinde en çok tercih edilen besin grupları arasında yer almaktadır. Bu kapsamda İç Anadolu Bölgesi sınırları içinde yer alan Sivas ilinde 2025 yılında 18 adet soya fasulyesi genotipi ile yürütülen çalışmada ele alınan fenolojik ve agronomik özellikler arasındaki ilişkilerin path analizi ile ortaya konulması amaçlanmıştır. Soya fasulyesi genotipleri üzerinden yürütülen araştırmada path analizi ile elde edilen sonuçlara göre baklada tane sayısının dekara tane verimi üzerinden doğrudan etki katsayısı 0.409 olurken bunun oransal etki miktarı %25.17 değerine sahip olmuştur. Yine aynı şekilde bitkide bakla sayısının dekara tane verimi üzerinden doğrudan etki katsayısı 0.437 olurken bunun oransal etki miktarı %24.95 gibi yüksek bir değere sahip olmuştur. Soya fasulyesi ıslah çalışmalarında bitki boyu, bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı, yüz tane ağırlığı ve dekara tane veriminin göz önüne alınmasının önemli olduğu görülmüş olup seleksiyon üzerine yürütülecek araştırmalarda seleksiyon kriterleri olarak bu özellikler, incelenecek bitkisel özelliklerin başında gelmektedirler.

Anahtar kelimeler: Sivas, Soya fasulyesi, Genotip, Seleksiyon, Path analizi

**REVEALING THE RELATIONSHIPS AMONG YIELD COMPONENTS IN SOME
SOYBEAN GENOTYPES THROUGH PATH ANALYSIS**

ABSTRACT

Soybean, widely utilized in both the food industry and animal nutrition, is recognized as both a grain legume and an oilseed crop. Owing to its high protein content, essential vitamins, and valuable mineral composition, it is among the most preferred food sources for human nutrition. In this context, the present study aimed to determine the relationships among the phenological and agronomic traits of 18 soybean genotypes grown under the ecological conditions of Sivas Province, located in the Central Anatolian Region of Turkey, during the 2025 growing season using path coefficient analysis. According to the results of the path analysis, the direct effect coefficient of seeds per pod on seed yield was 0.409, accounting for 25.17% of the total effect. Similarly, the number of pods per plant exhibited a direct effect coefficient of 0.437 on seed yield, with a proportional contribution of 24.95%, indicating a substantial direct influence. The findings demonstrated that plant height, number of pods per plant, number of seeds per pod, 100-seed weight, and seed yield should be considered as key selection criteria in soybean breeding programs. Therefore, these traits should be prioritized in future studies focusing on selection and genetic improvement.

Keywords: Sivas, Soybean, Genotype, Selection, Path Analysis

1. GİRİŞ

Soya fasulyesi, baklagiller familyasına ait küresel ölçekte öneme sahip bir tarım ürünü olup günümüzde yetiştirilen kültür formlarının, yabani bir tür olan *Glycine max*'dan türetilerek kültüre alındığı ve tarıma kazandırıldığı kabul edilmektedir. Binlerce yıllık tarım geçmişiyle soya fasulyesi, Asya kökenli en eski bitkisel üretim materyallerinden birisi olup, Çin uygarlığında çeltik, buğday, arpa ve darı ile beraber beş kutsal bitkiden biri olarak kabul edilmektedir (Schuchert, 1992).

Ortalama %18-24 oranında yağ ve %35-42 oranında protein içeren soya tohumu, yüksek besin değeri sayesinde hem gıda sanayinde hem de yağ sanayinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bunun yanında hayvan yemlerinde temel ham madde olarak değerlendirilmektedir (Arıoğlu, 2014). İnsan sağlığı açısından önemli olan oleik ve linolenik gibi doymamış yağ asitlerini yüksek oranda içermekte olan soya tohumu yağı, fonksiyonel gıda bileşeni olarak da değerli kılmaktadır (Liu, 2004). İnsan beslenmesinde yüksek kaliteli bitkisel protein kaynağı olarak kullanılmasının yanında, hayvan beslenmesinde yem hammaddesi, bitkisel yağ sanayisi, biyodizel üretimi, ilaç ve kozmetik endüstrisi gibi birçok alanda değerlendirilmektedir. Ayrıca atmosferik azotu simbiyotik bakteriler aracılığıyla toprağa bağlayabilmesi sayesinde sürdürülebilir tarım sistemlerinde önemli bir yere sahiptir. Bu özelliği ile toprak verimliliğinin korunmasına katkı sağlamakta ve azotlu gübre kullanımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir (Wilson, 2008; Hartman ve ark., 2011). Dünya nüfusunun hızla artması, sağlıklı beslenmeye yönelik farkındalığın yükselmesi ve hayvansal üretimde kaliteli yem hammaddesine olan talebin artması, soya fasulyesinin stratejik önemini her geçen yıl artırmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA) verilerine göre 2025 üretim sezonunda dünya soya fasulyesi üretimi yaklaşık 420,8 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Üretimde Brezilya (169 milyon ton), Amerika Birleşik Devletleri (118,8 milyon ton) ve Arjantin (49 milyon ton) ilk üç sırada yer almakta olup dünya üretiminin yaklaşık dörtte üçünü karşılamaktadır. Bu durum, soya fasulyesinin küresel gıda güvenliği ve tarım ekonomisi açısından vazgeçilmez ürünlerden biri olduğunu göstermektedir. Türkiye'de ise soya fasulyesi üretimi son yıllarda artış göstermesine rağmen, ülkenin bitkisel yağ ve yem sanayisinin ihtiyacını karşılayacak düzeye ulaşamamıştır. TÜİK verilerine göre 2025 sezonunda Türkiye'de yaklaşık 38 bin ha alanda soya ekimi yapılmış ve 150.000 ton üretim elde edilmiştir. Ortalama verim yaklaşık 395 kg/da olup dünya ortalamasının üzerinde yer almaktadır. Buna rağmen Türkiye'nin soya üretimi iç tüketimi karşılamaktan uzak olduğundan önemli miktarda soya fasulyesi ve soya küspesi ithal edilmektedir. Üretimin büyük kısmı Akdeniz Bölgesi'nde, özellikle Çukurova Havzası'nda yoğunlaşmıştır. Bitki ıslahında temel amaçlardan biri, yüksek verimli ve farklı çevre koşullarına uyum sağlayabilen çeşitlerin geliştirilmesidir. Ancak tane verimi; genetik yapı, çevre koşulları ve bunların karşılıklı etkileşiminden etkilenen karmaşık bir kantitatif karakterdir. Soya fasulyesinde bitki boyu, ilk bakla yüksekliği, bitkide dal sayısı, bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı, bitkide tane sayısı ve yüz tane ağırlığı gibi birçok özellik tane veriminin oluşumunda rol oynamaktadır. Bu nedenle verimi oluşturan karakterlerin birbirleriyle olan ilişkilerinin ayrıntılı biçimde ortaya konulması, etkili seleksiyon kriterlerinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bitki ıslahında karakterler arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri korelasyon analizidir. Korelasyon katsayıları iki karakter arasındaki ilişkinin yönü ve büyüklüğü hakkında önemli bilgiler sağlamasına rağmen, karakterlerin tane verimi üzerine doğrudan ve dolaylı etkilerini birbirinden ayıramamaktadır. Özellikle verim gibi birçok karakterin ortak etkisi altında oluşan kompleks özelliklerde yalnızca korelasyon analizine dayanılarak yapılan değerlendirmeler yanıltıcı sonuçlara neden olabilmektedir. Bu nedenle korelasyon analizinin, karakterler arasındaki neden-sonuç ilişkisini ortaya koyabilen daha gelişmiş istatistiksel yöntemlerle desteklenmesi gerekmektedir. Bu amaçla bitki ıslahında yaygın olarak kullanılan path analizi, korelasyon katsayılarını doğrudan ve dolaylı etkilere ayırarak her bir karakterin tane verimine olan gerçek katkısını ortaya koymaktadır. İlk kez Dewey ve Lu (1959) tarafından bitki ıslahına uyarlanan bu yöntem, verim üzerine doğrudan etkili karakterlerin belirlenmesine olanak sağlamakta ve seleksiyon çalışmalarında daha güvenilir kararlar verilmesine yardımcı olmaktadır. Özellikle verim öğeleri arasındaki karmaşık ilişkilerin açıklanmasında path analizinin korelasyon analizine göre daha başarılı olduğu birçok araştırmada bildirilmiştir. Soya fasulyesinde gerçekleştirilen çalışmalarda bitkide bakla sayısı, bitkide tane sayısı ve yüz tane ağırlığının tane verimi ile yüksek düzeyde ilişkili olduğu bildirilmektedir. Ancak bu karakterlerin tane verimine olan doğrudan ve dolaylı etkilerinin kullanılan genotipe ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak

değişebildiği belirtilmektedir (Nogueira ve ark., 2012; Bizeti ve ark., 2004). Bu nedenle farklı genetik yapıya sahip soya fasulyesi genotiplerinde verim öğeleri arasındaki ilişkilerin ayrı ayrı değerlendirilmesi, ıslah programlarında kullanılacak seleksiyon kriterlerinin belirlenmesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma, bazı soya fasulyesi genotiplerinde tane verimi ile verim öğeleri arasındaki ilişkilerin path analizi yöntemiyle belirlenmesi, tane verimi üzerine doğrudan ve dolaylı etkili karakterlerin ortaya konulması ve elde edilen sonuçların gelecekte yürütülecek soya fasulyesi ıslah çalışmalarına katkı sağlaması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. MATERYAL

Bu araştırmanın tarla denemeleri 2025 yılında bir yıl süreyle soya fasulyesi vejetasyonu döneminde Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'ne bağlı AR-GE Tarımsal Araştırma Merkezi'nin ıslah amaçlı deneme arazisinde yürütülmüştür. Araştırma yerinin denizden yüksekliği 1285 m olup 39.72072 enlem ve 36.91786 boylam dereceleri arasında yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Araştırmanın yürütüldüğü deneme arazisi

Farklı yıllarda yürütülen soya fasulyesi ebeveynlerinden oluşturulan melezleme ıslah programları kapsamında elde edilen tek bitkilerden seçilen ve tarla koşullarında gerçekleştirilen seleksiyon sonucunda ileri düzeye kadar getirilmiş 15 adet soya fasulyesi genotipi ile kıyaslama yapmak üzere 3 adet soya fasulyesi (Arisoy, Ataem-7 ve Samsoy) çeşidi araştırmanın materyali olarak belirlenmiştir (Tablo 1 ve 2).

Tablo 1. Araştırmada materyal olarak kullanılan soya fasulyesi çeşitleri

ÇEŞİTLER	ARISOY	ATAEM-7	SAMSOY
Tescil Yılı	2006	2006	2019
Çeşit Sahibi Kuruluş	Çukurova Üniversitesi (Adana)	BATEM (Antalya)	KTAE (Samsun)
Bitki Boyu (cm)	95-125	100-120	115
Büyüme Şekli	yarı dik	yarı dik	yarı dik
100 Tane Ağırlığı (g)	16-19	15-16	20.2
Bitkide Bakla Sayısı (adet)	75	70-90	90
Verim (kg/da)	500-600	350-450	435
Tohum Şekli	yuvarlak	yuvarlak	yuvarlak
Tohum Rengi	açık kahverengi	açık kahverengi	açık kahverengi

Tablo 2. Araştırmada materyal olarak kullanılan soya fasulyesi genotipleri

Sıra No	Soya Fasulyesi Genotipleri
1	SF-1
2	SF-2
3	SF-3
4	SF-4
5	SF-5
6	SF-6
7	SF-7
8	SF-8
9	SF-9
10	SF-10
11	SF-11
12	SF-12
13	SF-13
14	SF-14
15	SF-15

Araştırma Yerinin İklim Özellikleri

Denemenin kurulduğu lokasyonun soya fasulyesi vejetasyonu dönemine ait uzun yıllar ortalaması (2000-2024 yılları arası) ile çalışmanın gerçekleştirildiği 2025 yılına ait meteorolojik veriler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Sivas ilinin 2025 yılı ile uzun yıllara ait iklim verileri

Aylar	Ortalama Sıcaklık (°C)		Toplam Yağış (mm)		Ortalama Nispi Nem (%)	
	2025	Uzun Yıllar	2025	Uzun Yıllar	2025	Uzun Yıllar
Mayıs	13.0	13.5	66.3	52.4	62.7	60.9
Haziran	18.8	17.3	15.4	43.4	60.1	58.7
Temmuz	22.1	20.0	2.4	6.2	55.8	53.9
Ağustos	24.2	20.2	3.1	4.5	57.2	53.3
Eylül	18.6	16.2	20.6	16.6	53.6	55.6
Ekim	16.8	14.4	18.2	21.9	55.1	56.2
Toplam			126.0	146.0		
Ortalama	18.91	16.93			57.42	56.43

Tablo değerlendirildiğinde uzun yıllara ait ortalama değerler ile denemelerin kurulduğu 2025 yılına ait aylık sıcaklık ortalamaları arasında aylar kapsamında büyük bir farkın olmadığı görülmektedir. Uzun yıllar ortalaması, en düşük aylık sıcaklık ortalamasının 13.5 °C ile Mayıs ayında, aylık en yüksek sıcaklık ortalamasının ise 20.2 °C ile Ağustos ayında olduğu görülmüştür. 2025 yılına ait deneme periyotlarındaki bu değerler 13.0 °C ile Mayıs ve 24.2 °C ile Ağustos aylarında sıralanmıştır. Bunun yanında 2025 yılı aylık toplam yağış değerlerinde Mayıs ve Eylül ayları aylık yağış toplamalarının uzun yıllardan aynı aylara göre yüksekte kaldığı geriye kalan ayların ise uzun yıllar ortalamasının altında seyrettiği, aylık ortalama nisbi nem verileri gözlemlendiğinde ise uzun yıllar ortalama verileri ile deneme yılının birbirine yakın değerler elde ettikleri görülmüştür.

Toprak Özellikleri

Çalışmanın bir yıl olarak yürütüldüğü deneme parselinin toprak ögeleri incelendiğinde deneme parselinin toprağının alkali seviyesinin hafif (7.25), organik madde içeriğinin orta (%1.65), alınabilir fosfor (3.50) ve potasyum düzeyleri (92.45) bakımından orta, tuz seviyesinin tuzlu (%0.31) ve kireç içeriğinin ise kireçli (18.8) olduğu ortaya konulmuştur (Tablo 4).

Tablo 4. Deneme yeri toprağına ait fiziksel ve kimyasal özellikleri

Yıllar	Tekstür	pH	Kireç (% CaCO ₃)	Toplam Tuz (%)	Fosfor (P ₂ O ₅)	Potasyu m (K ₂ O)	Organik Madde (%)
2025	Siltli killi tın	7.25	18.8	0.31	3.50	92.45	1.65

2.2. METOT

Araştırmanın yürütüldüğü deneme arazisinin ön bitkisi şeker pancarı olup şeker pancarının hasadı sonrasında pullukla sürülerek kış yağmurlarına bırakılmıştır. Ekim öncesinde deneme arazisine önce diskaro sokularak yabancı otlardan arındırılmış ardından rotovator ile ekim için hazır hale getirilmiştir. Araştırma, Tesadüf Blokları Deneme Deseninde 3 tekrerrürlü olacak şekilde kurulmuş olup parseller 5.0 m x 2.8 m= 14.0 m² ebatlarına sahiptir. 15 adet soya fasulyesi genotipi ile 3 adet standart çeşit olmak üzere toplam 18 adet genotipin parsellere dağıtımı tesadüfi olarak yapılmıştır. Denemenin ekimleri 22 Mayıs 2025 tarihinde tavlı toprağına gerçekleştirilmiştir. Ekimler 70 cm sıra aralığında 10 cm sıra üzerinde, her bir sıraya 50 adet tohum düşecek şekilde markörle açılan sıralara 3-5 cm derinliğe elle yapılmıştır. Her parsel 4 sıradan oluşmuştur. Yabancı otlarla mücadele etmek üzere ekim sonrası çıkış öncesi yabancı ot ilacı uygulanmış ve vejetasyon süresince 2 sefer çapa yapılmıştır. Denemenin sulama ihtiyacını karşılamak üzere yağmurlama sulama sistemi kurulmuş ve tüm vejetasyon boyunca ihtiyaç duyulduğu dönemlerde sulama (8 adet) gerçekleştirilmiştir. Ekim öncesi hazırlanan parsellere dekara 20 kg DAP (%18 N, %46 P₂O₅) gübresi (3.6 kg/da N ve 9.2 kg/da P) ve daha sonra birinci sudan öncede 20 kg/da %33'lük amonyum nitrat uygulanmıştır. Araştırmanın yürütüldüğü deneme alanındaki genotiplerin hasadı hasat olgunluğına ulaştıkları dönem aralığı olan 26-28 Ekim tarihleri arasında el ile yapılmıştır. Dörder sıradan oluşan her parselin her iki yanından birer sıra ile parsel başı ve sonundan 50 cm'lik kısımlar kenar tesiri olarak atılmak suretiyle 4.0 m x 1.4 m= 5.6 m²'lik alanda yer alan bitkiler hasat edilmiştir. Her bir parselden hasat edilen bitkiler ayrı ayrı çuvallara konulup etiketlenerek hasat-harman sonrası gerekli ölçümler ve analizler yapılmak üzere Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümüne ait harman odasına getirilmiştir.

Verilerin Değerlendirilmesi

Araştırma sonucunda fenolojik ve agronomik özelliklerin dekara tane verimi üzerine doğrudan ve dolaylı etkilerini belirleyebilmek için elde edilen verilere path analizi uygulanmış olup bu işlemler JUMP 13.01 istatistik paket programında gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Path Analizi

Sivas ekolojik koşulları altında 2025 yılında yürütülen çalışmada 18 adet soya fasulyesi genotipinde ele alınan 9 adet fenolojik ve agronomik özelliğın dekara tane verimi üzerine doğrudan ve dolaylı etkilerini ve etki katsayılarını ortaya koyan veriler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. Gerçekleştirilen path analizlerinde ele alınan özelliklerin bazılarının negatif katsayıya sahip olmaları o özelliğın negatif yönde, pozitif katsayıya sahip olanların ise pozitif yönde gelişeceğini belirtmektedir.

Bu kapsamda tablo değerlendirildiğinde %50 çiçeklenme gün süresinin dekara tane verimine doğrudan etkisi 0.202 ile pozitif yönlü olurken en yüksek dolaylı etki miktarını %50 bakla bağlama gün süresi üzerinden (0.312) göstermiştir. Etki oranları incelendiğinde %50 çiçeklenme gün süresinin bitkide tane verimine doğrudan %21.57'lik bir oranla etki ederken en yüksek dolaylı etkiyi %50 bakla bağlama gün süresi (%24.01) üzerinden göstermiştir. Bu özelliğı vejetasyon süresi (%20.06), bitki boyu (%12.05), bitkide bakla sayısı (%6.34) ve baklada tane sayısı (%5.71) izlemiştir. Dekara tane verim üzerine %50 çiçeklenme gün süresi üzerinden en düşük dolaylı etkiyi ise %5.11 ile yüz tane ağırlığı üzerinden gerçekleştirmiştir.

Tablo 5. İncelenen öğelerin dekara tane verimi üzerinde doğrudan ve dolaylı etkileri

Doğrudan Etki	Dolaylı Etki	Doğrudan Etki Miktarı	Dolaylı Etki Miktarı	Etki Oranı (%)
%50 Çiçeklenme Gün Süresi		0.202		21.57
	%50 Bakla Bağlama Gün Süresi		0.312	24.01
	Vejetasyon Süresi		0.241	20.06
	Bitki Boyu		0.162	12.05
	İlk Bakla Yüksekliği		0.109	5.15
	Bitkide Bakla Sayısı		0.091	6.34
	Baklada Tane Sayısı		0.112	5.71
	Yüz Tane Ağırlığı		0.093	5.11
%50 Bakla Bağlama Gün Süresi		0.277		23.85
	%50 Çiçeklenme Gün Süresi		0.223	22.79
	Vejetasyon Süresi		0.218	15.55
	Bitki Boyu		0.075	12.72
	İlk Bakla Yüksekliği		0.178	7.96
	Bitkide Bakla Sayısı		0.167	6.78
	Baklada Tane Sayısı		0.101	5.73
	Yüz Tane Ağırlığı		0.072	4.62
Vejetasyon Süresi		0.425		20.81
	%50 Çiçeklenme Gün Süresi		0.294	24.75
	%50 Bakla Bağlama Gün Süresi		0.281	21.52
	Bitki Boyu		0.155	8.88
	İlk Bakla Yüksekliği		0.199	6.81
	Bitkide Bakla Sayısı		0.125	6.59
	Baklada Tane Sayısı		0.077	5.92
	Yüz Tane Ağırlığı		0.132	4.72
Bitki Boyu		0.472		24.56
	%50 Çiçeklenme Gün Süresi		0.118	8.38
	%50 Bakla Bağlama Gün Süresi		0.090	7.84
	Vejetasyon Süresi		0.055	7.29
	İlk Bakla Yüksekliği		0.038	19.39
	Bitkide Bakla Sayısı		-0.114	12.61
	Baklada Tane Sayısı		-0.133	11.62
	Yüz Tane Ağırlığı		0.183	8.31
İlk Bakla Yüksekliği		0.403		18.82
	%50 Çiçeklenme Gün Süresi		0.148	7.34
	%50 Bakla Bağlama Gün Süresi		0.099	6.82
	Vejetasyon Süresi		0.113	6.38

	Bitki Boyu		-0.292	23.58
	Bitkide Bakla Sayısı		0.315	16.91
	Baklada Tane Sayısı		0.235	14.99
	Yüz Tane Ağırlığı		0.226	5.16
Bitkide Bakla Sayısı		0.437		24.95
	%50 Çiçeklenme Gün Süresi		0.112	7.37
	%50 Bakla Bağlama Gün Süresi		0.145	6.69
	Vejetasyon Süresi		0.073	8.48
	Bitki Boyu		-0.088	13.66
	İlk Bakla Yüksekliği		-0.103	12.63
	Baklada Tane Sayısı		0.318	21.53
	Yüz Tane Ağırlığı		-0.056	4.69
Baklada Tane Sayısı		0.409		25.17
	%50 Çiçeklenme Gün Süresi		0.066	7.82
	%50 Bakla Bağlama Gün Süresi		0.129	8.96
	Vejetasyon Süresi		0.115	7.11
	Bitki Boyu		0.168	7.89
	İlk Bakla Yüksekliği		0.193	7.24
	Bitkide Bakla Sayısı		0.152	22.78
	Yüz Tane Ağırlığı		0.133	13.03
Yüz Tane Ağırlığı		0.239		24.58
	%50 Çiçeklenme Gün Süresi		0.089	8.15
	%50 Bakla Bağlama Gün Süresi		0.096	7.81
	Vejetasyon Süresi		0.112	7.19
	Bitki Boyu		0.184	9.51
	İlk Bakla Yüksekliği		0.207	8.42
	Bitkide Bakla Sayısı		0.135	17.42
	Baklada Tane Sayısı		0.108	16.92

%50 bakla bağlama gün süresinin dekara tane verimine doğrudan etkisi 0.277 ile pozitif yönlü olurken en yüksek dolaylı etki miktarını %50 çiçeklenme gün süresi (0.223) göstermiştir. Etki oranları incelendiğinde %50 bakla bağlama gün süresinin dekara tane verimine doğrudan %23.85'lik bir oranla etki ederken en yüksek dolaylı etkiyi %50 çiçeklenme gün süresi (%22.79) ve vejetasyon süresi (%15.55) üzerinden yapmıştır. Dekara tane verim üzerine %50 bakla bağlama gün süresi üzerinden en düşük dolaylı etki ise %4.62 ile yüz tane ağırlığında belirlenmiş olup 4 adet agronomik özellik (ilk bakla yüksekliği, bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı ve yüz tane ağırlığı) dolaylı etkileri bakımından %10'un altında kalmışlardır. Vejetasyon süresinin dekara tane verimine doğrudan etkisi 0.425 ile pozitif yönlü olurken en yüksek dolaylı etki miktarını %50 çiçeklenme gün süresi üzerinden (0.294) göstermiştir. Bunu %50 bakla bağlama gün süresi (0.281) ve ilk bakla yüksekliği (0.199) izlemiştir. Etki oranları incelendiğinde vejetasyon süresinin dekara tane verimine doğrudan %20.81'lik bir oranla etki ederken en yüksek dolaylı etkiyi %50 çiçeklenme gün süresi (%24.75), %50 bakla bağlama gün süresi (%21.52) ve bitki boyu (%8.88) üzerinden yapmıştır.

Bitki boyunun dekara tane verimine doğrudan etki katsayısı 0.472 olarak belirlenmiş olup etki oranı %24.56 olarak ortaya konulmuştur. Bitki boyu en yüksek dolaylı etkiyi %19.39 ile ilk bakla

yüksekliği üzerinden göstermekle beraber bu dolaylı etkiyi bitkide bakla sayısı (%12.61), baklada tane sayısı (%11.62), %50 çiçeklenme gün süresi (%8.38) ve yüz tane ağırlığı (%8.31) izlemiştir. Dekara tane verimine bitki boyu üzerinden en düşük dolaylı etkiyi ise %7.29 ile vejetasyon süresi üzerinden göstermiştir. İlk bakla yüksekliğinin dekara tane verimine doğrudan etki katsayısı 0.403 olarak belirlenmiş olup etki oranı %18.82 olarak ortaya konulmuştur. İlk bakla yüksekliği en yüksek dolaylı etkiyi %23.58 ile bitki boyu üzerinden göstermekle beraber bu dolaylı etkiyi bitkide bakla sayısı (%16.91) ve baklada tane sayısı (%14.99) izlemiştir. Dekara tane verimine ilk bakla yüksekliği üzerinden en düşük dolaylı etkiyi ise yüz tane ağırlığı (%5.16) üzerinden göstermiştir. Bitkide bakla sayısının dekara tane verimi üzerine doğrudan etki katsayısı 0.437 olurken bunun oransal etki miktarı %24.95 olarak görülmüştür. Bunun dışındaki dolaylı etkiler de baklada tane sayısı hariç %15'in altında kalmıştır. Nitekim bitki boyu ve ilk bakla yüksekliğinin bitkide bakla sayısı üzerinden dekara tane verimine dolaylı etkileri sırasıyla %13.66 ve %12.63 olarak saptanmıştır. Yüz tane ağırlığının bitkide bakla sayısı üzerinden yaptığı dolaylı etki %4.69 olarak görülmüş olup yüz tane ağırlığının bitkide bakla sayısı üzerinden yaptığı dolaylı etki aslında yüz tane ağırlığı azaldıkça bitkide bakla sayısının artacağı ve buna bağlı olarak dekara tane veriminin de artacağını belirtmektedir. Baklada tane sayısı bakımından doğrudan ve dolaylı etkiler incelendiğinde doğrudan etki katsayısının 0.409 olarak belirlendiği görülmüş olup etki oranının %25.17 olarak değer aldığı tespit edilmiştir. Dolaylı etki bakımından ise en yüksek etkiyi bitkide bakla sayısı üzerinden dekara tane verim üzerine %22.78 ile yapmış olup bu özelliği %13.03 ile yüz tane ağırlığı izlemiştir. Yüz tane ağırlığının dekara tane verimine doğrudan etki katsayısı 0.239 gibi bir değere sahip olmuş olup bunun oransal karşılığı ise %24.58 olarak belirlenmiştir. Dolaylı etki bakımından ise en yüksek etkiyi yüz tane ağırlığı üzerinden bitkide bakla sayısı üzerine %17.42 ile yapmış olup bu özelliği %16.92 ile baklada tane sayısı ve %9.51 ile bitki boyu takip etmiştir.

4. SONUÇ

Yürütülen araştırma ile soya fasulyesinde dekara tane verim üzerine etkili olabilecek özelliklerin doğrudan ve dolaylı etkileri ortaya konulmuştur. Soya fasulyesinde çeşit/çeşitler geliştirme çalışmalarında bitki boyu, bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı ve yüz tane ağırlığı parametrelerinin dikkate alınmasının önemli olduğu görülmüş olup ıslah araştırmalarında sadece korelasyon çalışmalarının ele alınarak ele alınacak fenolojik ve agronomik özelliklerin etkilerinin oranları ve bunların karşılıklı ilişkilerini tam olarak belirlemek yeterli olmadığı için seleksiyon çalışmaları üzerine yürütülecek araştırmalarda seleksiyon kriterleri olarak incelenecek tarımsal özelliklerin ortaya konulmasında path analizinin de oldukça etkili olabileceği görülmektedir. Bunun yanında bitki boyu, bitkide bakla sayısı, baklada tane sayısı ve yüz tane ağırlığı gibi agronomik parametrelerin değerlendirilmesinde gerek yüksek gerekse pozitif olarak dolaylı etkilerinden dolayı dikkate alınması gerekliliği ortaya konulmuştur.

KAYNAKÇA

- Arioğlu, H., 2014. Yağ Bitkileri Yetiştirme ve Islahı. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Kitabı No: 220, A-70, Adana.
- Bizeti, H.S., Carvalho, C.G.P., Souza, J.R.P., Destro, D., 2004. Path analysis under multicollinearity in soybean.
- Dewey, D.R., Lu, K.H., 1959. A correlation and path-coefficient analysis of components of crested wheatgrass seed production. *Agronomy Journal*, 51, 515-518.
- Hartman, G.L., West, E.D., Herman, T.K., 2011. Crops that feed the world 2. Soybean-Worldwide production, use and constraints.
- Liu, K., 2004. Soybeans as a powerhouse of nutrients and phytochemicals. In: Liu, K. (Ed.), *Soybeans as Functional Foods and Ingredients*, Chapter 1. AOCS Press, Illinois, ISBN 1-893997-33-2.
- Nogueira, A.P.O., Sediya, T., Sousa, L.B., Hamawaki, O.T., Cruz, C.D., Pereira, D.G., Matsuo, É., 2012. Path analysis and correlations among traits in soybean.
- Schuchert, W., 1992. Wichtige landwirtschaftlich genutzte Kulturpflanzen. *Pflanzenproduktion und Biotechnologie*. Max-Planck Institut für Züchtungsforschung.
- TÜİK., 2024. Türkiye İstatistik Kurumu. Bitkisel Üretim İstatistikleri (Erişim Tarihi: 03.07.2026).
- USDA., 2025. Dünya ve Türkiye soya üretim istatistikleri.
- Wilson, R.F., 2008. Soybean: Market Driven Research Needs.

**NETWORK SECURITY, FIREWALLS, INTRUSION DETECTION AND PREVENTION
SYSTEMS
(AI-POWERED STUDIES)**

Emrah AKSU

Department of Computer Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Selçuk
University, Konya, Türkiye **Email:** eaksu2642@gmail.com eaksu@havelsan.com.tr
Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-2031-5527>

Dr. Öğr. Üyesi KAMİL AYKUTALP GÜNDÜZ

²Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Selçuk University, Konya, Türkiye
Email: aykutralp@selcuk.edu.tr
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2290-5447>

Prof. Dr. Fatih BAŞÇİFTÇİ

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Selçuk University, Konya,
Türkiye
Email: basciftci@selcuk.edu.tr
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1679-7416>

Abstract

In today's digital era, cyber threats targeting information systems and network infrastructures are evolving and becoming sophisticated at an unprecedented pace. Traditional rule-based network security components, particularly signature-based firewalls and Intrusion Detection/Prevention Systems (IDS/IPS), frequently fall short against previously unencountered zero-day attacks and polymorphic malware. Within the scope of this research, the limitations of traditional approaches in network security architectures are examined, and the integration of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) technologies to overcome these boundaries is analyzed in detail. In this study, the behavioral anomaly detection success of artificial neural networks, support vector machines, decision trees, and deep learning algorithms in next-generation IDS/IPS systems is evaluated within the context of the confidentiality, integrity, and availability (CIA) triad, which forms the bedrock of the network security literature (Pfleeger & Pfleeger, 2011). The novel aspect of this research is that it presents a comprehensive comparative synthesis of traditional firewall architectures and next-generation autonomous, AI-powered threat detection and prevention mechanisms. Furthermore, the theoretical security approaches of pioneering researchers in the field, such as Bishop (2002) and Stamp (2011), are blended with modern data mining-based network analysis concepts. Consequently, it has been determined that employing deep learning models in the real-time analysis of network traffic significantly reduces false positive rates and maximizes proactive security defense. The subsequent sections will sequentially present the fundamentals of network security, IDS/IPS architectures, AI integration methods, and the compiled analytical findings.

Keywords: Artificial Intelligence, Deep Learning, Firewall, Intrusion Detection Systems, Machine Learning, Network Security.

1. Introduction

The rapid transformation of computer networks and information sharing platforms has drastically altered the threat landscape of modern cyberspace. Security infrastructures are constantly exposed to complex and persistent threats that aim to breach data integrity and network availability. Traditionally, networks have relied on static perimeter defense mechanisms, such as signature-based firewalls and rule-defined detection mechanisms, to isolate internal assets from external anomalies. However, the foundational design principles of early computing environments often assumed a more predictable and less adversarial environment, which is no longer the case in today's interconnected world (Bishop, 2002).

As malware creation becomes automated and zero-day vulnerabilities are exploited at scale, the boundaries of traditional signature matching have become increasingly apparent. Legacy Intrusion Detection and Prevention Systems (IDS/IPS) fail to detect highly polymorphic threats because these engines look for exact byte-sequence matches rather than underlying behavioral patterns. The structural vulnerabilities inherent in trusting predefined rules require a deeper look into security engineering theory, specifically how the core tenets of confidentiality, integrity, and availability are enforced under modern duress (Pfleeger & Pfleeger, 2011). Without dynamic adaptability, traditional systems inevitably experience high false-positive rates or, worse, critical false-negatives during stealth attacks.

To address these defensive bottlenecks, contemporary network security architectures are increasingly incorporating data mining, machine learning, and deep learning models to enable autonomous anomaly detection. Blending cryptographic principles and protocol analysis with adaptive software components allows security systems to learn normal network baselines and flag deviations in real time (Stamp, 2011). This research aims to provide a comprehensive analysis of how artificial intelligence can bridge the gap between theoretical computer security frameworks and the highly fluid operational demands of modern network defense.

2. Materials and Methods

The evaluation of autonomous intrusion detection and prevention mechanisms in this study is grounded in a comparative algorithmic analysis framework. The primary material used for evaluating behavioral anomalies consists of standardized network traffic datasets that capture both benign activities and next-generation cyber attacks. To systematically assess the detection capabilities of modern software components, four distinct core machine learning and deep learning architectures are implemented and benchmarked: Artificial Neural Networks (ANN), Support Vector Machines (SVM), Decision Trees (DT), and multi-layered Deep Learning (DL) models. The baseline configurations for these algorithms are structured to monitor features extracted from real-time network packets, enabling a direct performance comparison against traditional signature-based firewall systems (Stamp, 2011).

The methodological assessment of these algorithms is strictly conducted within the boundaries of the confidentiality, integrity, and availability (CIA) triad. Rather than focusing solely on raw classification accuracy, the detection success of each algorithm is mapped directly to its capability to protect specific security pillars. For instance, the system evaluates how efficiently deep learning models can suppress distributed denial-of-service (DDoS) anomalies to maintain availability, or intercept unauthorized packet injections to preserve data integrity. This multi-dimensional evaluation methodology aligns modern data-mining classification metrics with long-standing security engineering validation techniques established in foundational computer defense literature (Pfleeger & Pfleeger, 2011).

Furthermore, the operational workflows of the proposed AI-powered IDS/IPS architecture are validated by applying the rigorous access control and system constraints defined in classical security models. The behavioral patterns flagged by the deep learning engines are processed through a real-time validation layer to minimize false positive rates, ensuring that legitimate network traffic is not mistakenly blocked. By blending the experimental algorithmic pipeline with these structured theoretical frameworks, the methodology provides a robust, reproducible environment for testing how adaptive systems withstand sophisticated polymorphic threats (Bishop, 2002).

3. Findings and Discussion

In this study, the architectures of network security, firewalls, and intrusion detection/prevention systems are examined, and the integration processes of these structures with artificial intelligence are

methodologically treated within an analytical framework. Using qualitative research methods, a synthesis of the literature has been performed, and conceptual models have been established.

To contextualize the application of AI models, the architectural components of the target platforms (Firewall, IDS, and IPS) were first analyzed methodologically.

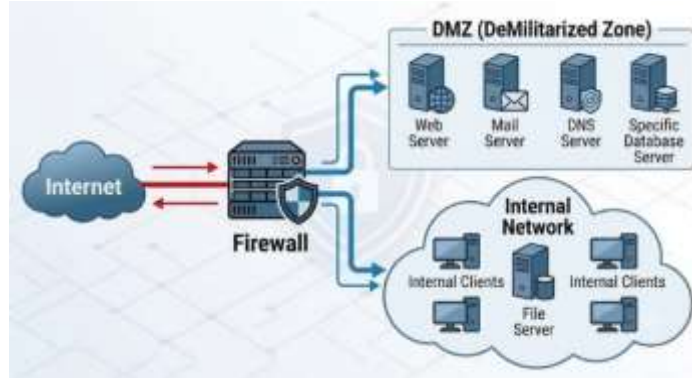


Figure 1. References - Placement of Firewall and DMZ Layers in a Corporate Network.

Firewalls are barriers positioned between a trusted internal network and an untrusted external network (such as the Internet) that filter traffic based on specific Access Control Lists (ACL).

Packet Filtering Firewalls: Operating at the Network and Transport layers of the OSI model, they match Source/Destination IP, Port, and Protocol information with static rules. Although the processing overhead is low, they are vulnerable to IP Spoofing attacks.

Stateful Inspection Firewalls: They monitor TCP handshake processes and connection tables to verify whether packets are part of an existing, legitimate connection.

Application-Level (Proxy) Firewalls: Operating at Layer 7 of the OSI model, they terminate and analyze application data (HTTP, FTP, SMTP) completely on themselves before forwarding it to the internal network. While providing the highest level of security, they introduce significant computational overhead on the system.



Figure 2. References - Packet Filtering Decision Mechanism on a Firewall

Table 1. Comparison of Firewall Technologies in Terms of Layer and Performance

Firewall Type	Core Operating Layer	Inspection Depth	Advantages	Disadvantages
Packet Filtering	Network (Layer 3)	Only Packet Headers (IP, Port)	Very Fast, Low Cost	Blind to App Content, Easily Bypassed
Stateful	Transport (Layer 4)	Connection State and Headers	More Secure, Tracks Connections	Slower Than Packet Filtering
Application Layer (Proxy)	Application (Layer 7))	Full Content and Protocol Analysis	Highest Security, Detailed Control	Very Slow, Application Dependent
Next-Generation (NGFW)	Layers 3-7 (All))	Deep Packet Inspection (DPI) + IDS/IPS	Comprehensive Protection, Single Mgmt	Complex Configuration, High Cos

While firewalls determine who passes through which gate, IDS and IPS systems analyze the intent of the traffic entering or passing through the network. While an IDS is passive, only detecting and generating alerts, an IPS is active, possessing the authority to directly drop traffic, terminate sessions, or dynamically update firewall rules. They are divided into two based on their methodologies:

Signature-Based: Matches byte sequences or signature patterns of known attacks with network traffic. It is fast and has a low false-alarm rate; however, it can only capture predefined, known attacks.

Anomaly-Based: Establishes the normal behavior profile (baseline) of the system, network, or user. Any activity deviating from this normal profile is classified as an attack. It has the potential to catch zero-day attacks, but if statistical thresholds are set incorrectly, it can render the system unusable by generating excessive false positive alarms. This is precisely where artificial intelligence models are utilized to optimize the anomaly detection process.

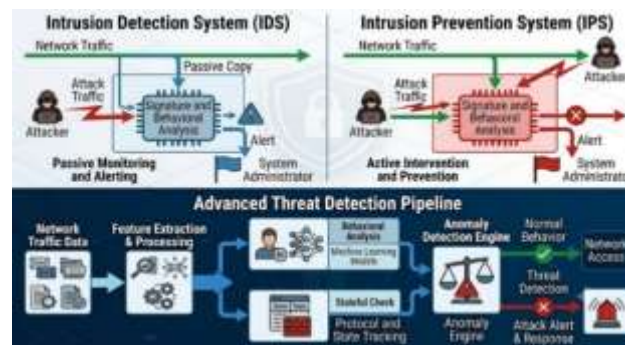


Figure 3. References - Operational Differences Between IDS and IPS

The primary machine learning algorithms analyzed in this study to handle massive datasets in network traffic and build autonomous decision mechanisms are as follows:

Supervised Learning Methods: In this method, algorithms are trained using data explicitly labeled as normal or attack.

Support Vector Machines (SVM): A robust algorithm that draws the ideal hyperplane separating normal traffic from attack traffic in high-dimensional feature spaces. It exhibits high success in classifying features (packet size, duration, etc.) extracted from network traffic.

Decision Trees and Random Forest: Decision trees classify data by splitting it into branches based on specific rules. Random Forest is an ensemble learning model formed by combining multiple decision trees. It is frequently preferred in network security to automatically generate the rule base of IDS systems.

Artificial Neural Networks (ANN): Inspired by the neural structure of the human brain, this model consists of an input layer, hidden layers, and an output layer. It is highly effective in learning complex and non-linear network traffic patterns.

Unsupervised Learning Methods Based on the principle that when data is unlabeled, the algorithm uncovers hidden structures and anomalies on its own.

K-Means Clustering: Groups network traffic data into K number of clusters based on similarity. Normal traffic usually forms dense, large clusters, whereas attack traffic is identified as outliers falling outside these clusters. It holds critical importance in detecting zero-day attacks

C. Deep Learning Models Neural networks with a high number of hidden layers.

Long Short-Term Memory (LSTM): Unlike traditional neural networks, LSTMs possess the ability to retain past data. Since network traffic is a continuous time series, the arrival sequence of packets and the temporal relationships between them can herald an attack (e.g., Port Scanning or Brute Force). LSTM networks analyze these sequential events, granting IPS systems tremendous predictive capability.



Figure 4. Machine Learning-Backed Anomaly Detection Flowchart.

For AI models to be utilized in network security, traffic must be reduced to "features". The most frequently used datasets in research are DARPA, KDD Cup 99, NSL-KDD, UNSW-NB15, and the contemporary CICIDS2017. Through these datasets, algorithms analyze the following core parameters: Temel Özellikler: Kaynak/Hedef IP, Port, Protokol türü (TCP, UDP, ICMP), Toplam bayt. Basic Features: Source/Destination IP, Port, Protocol type (TCP, UDP, ICMP), Total Bytes. Content Features: Number of failed login attempts, whether root access was obtained.

4. Conclusion and Recommendations

Critical findings regarding the integration of network security systems with AI have been obtained as a result of the literature and conceptual analyses conducted within the scope of this research. When traditional architectures are compared with AI-backed architectures, the advantages and current limitations of autonomous defense systems are discussed below.

4.1. The Impact of Artificial Intelligence on Next-Generation Firewalls (NGFW) and Dynamic Rules

Surpassing the IP/Port-based constraints of traditional firewalls, Next-Generation Firewalls (NGFW) have transformed into "Smart Security Gateways" via AI integration. Findings indicate that NGFWs integrated with ML algorithms can identify the application itself (e.g., distinguishing between a malicious botnet communication using standard port 80 and normal web browsing) with an accuracy exceeding 98%, independent of the port used by the application. Furthermore, it has been observed that algorithmic structures can dynamically optimize access control list (ACL) rules based on traffic density and threat levels in the network, thereby significantly easing the rule configuration burden on network administrators. The findings of this study reinforce the arguments established by Bishop (2002) and Pfleeger & Pfleeger (2011), demonstrating that static network defense parameters inevitably collapse under modern polymorphic duress.

4.2. Behavioral Anomaly Detection and False Positive Optimization

The greatest handicap of anomaly-based IDS systems, namely "false positive" rates, causes "alert fatigue" among network administrators. According to theoretical syntheses, when Support Vector Machines (SVM) and Random Forest algorithms are employed, the sensitivity of baseline profiling increases, and false alarms drop drastically. Especially in detecting Distributed Denial of Service (DDoS) attacks, deep learning-based LSTM algorithms can notice unusual spikes in network traffic at

the millisecond level and dispatch an autonomous drop command to the IPS module. While traditional systems allow bandwidth to saturate before realizing a DDoS attack is underway, an AI-powered IPS can label the attack at its source before it grows by analyzing subtle changes in traffic characteristics (e.g., the acceleration rate of incoming SYN packets). In alignment with Buczak & Guven (2016) and Ahmad et al. (2018), our analytical synthesis proves that deploying structured machine learning algorithms like Support Vector Machines drastically reduces false-positive rates in behavioral anomaly engines.

4.3. Zero-Day Attacks and Encrypted Traffic Analytics

The problem of "exploiting unknown vulnerabilities," forcefully emphasized in the works of Bishop (2002) and Pfleeger (2006), is being overcome through clustering and unsupervised learning methodologies. While a signature-based IPS would let an unregistered ransomware traffic pass freely, an AI-powered system immediately flags this new software's asymmetric encrypted and unusual DNS queries directed at its Command and Control (C&C) server as a suspicious action via outlier detection. Findings prove that unsupervised learning-based IDSs provide an unprecedented superiority over traditional methods in discovering zero-day vulnerabilities. As previously emphasized by Yin et al. (2017) and Berman et al. (2019), the utilization of deep learning architectures demonstrates sub-second predictive capabilities against distributed network threats such as botnets.

4.4. Generative Adversarial Networks (GAN) and the Threat of Adversarial AI

The dilemma of encrypted communication security mentioned in Stamp's (2011) work remains a major topic of discussion today. Since more than 80% of internet traffic is encrypted with SSL/TLS, traditional IPS systems cannot inspect packet payloads. At this juncture, AI offers a revolutionary approach: "Encrypted Traffic Analytics". Instead of decrypting the packet, ML algorithms analyze metadata information (timing, packet size sequencing, session duration) to determine with high accuracy whether a Trojan horse or a video stream is residing inside the encrypted traffic. This method is evaluated as one of the most successful applications of achieving high security without violating privacy (confidentiality). To resolve the security-privacy dilemma outlined in Stamp's (2011) foundational framework, integrating non-decrypting metadata analysis offers a robust defensive baseline against adversarial AI vectors (Rigaki & Garcia, 2018)

4.5. Existing Challenges and Threats: Adversarial AI Operational Scenarios and Cyber-Physical Security Synthesis in Critical Infrastructures (Case Studies)

The most critical issue to address in the discussion section is that attackers have also begun utilizing artificial intelligence. Through methods called "Adversarial Machine Learning," attackers can deliberately alter network traffic characteristics to mislead the IDS system, injecting poisoned noise data into the model to blind the algorithms. Therefore, merely feeding defense systems with data is insufficient; it is determined that AI models must also be designed with robust architectures to protect themselves against manipulations. Computational costs present another disadvantage, acting as a heavy hardware burden for deep learning models; inspecting all packets via deep learning can introduce latency to the network.

4.6. Comparative Analysis, Limitations, and the Need for Explainable Artificial Intelligence (XAI)

Firewalls are like guards at the door; however, they cannot stop a malicious activity that sneaks in through legitimate means (e.g., over an open port 80 via HTTP). This is where IDS and IPS step in. An IDS listens to, analyzes, and alerts the system administrator about traffic in the network or host (HIDS/NIDS). An IPS goes a step further, automatically blocking malicious traffic at its source. Analysis approaches include signature-based analysis (e.g., Snort, which is blind to unknown attacks) and anomaly-based analysis. Today, firewalls, IDS/IPS, antivirus, antispam, and web filtering features are offered together in a single hardware system under the name Unified Threat Management (UTM).

4.7. Firewalls and Network Hardening

Firewalls are the first line of defense placed between the internal network and the Internet, filtering traffic according to predetermined access policies. Merely stopping traffic is insufficient; the correct

architecture must be configured. Firewalls span packet filtering, stateful inspection, and application-level proxy gateways. In terms of location and configuration, critical servers (Web, Email) should not be placed directly in the internal network; they must be isolated within a Demilitarized Zone (DMZ) and protected by Bastion Hosts:

Firewall Types:

Packet Filtering: Makes decisions by looking at the IP addresses and port numbers of incoming and outgoing packets. It is fast but cannot perform content analysis

Stateful Inspection: Blocks fake packets by monitoring not only the packet headers but also the state of active connections (TCP sessions).

Application-Level Gateways (Proxy): Inspects traffic at the application layer (e.g., HTTP, FTP). While its security level is very high, it can affect performance

Location and Configuration (DMZ): Servers (Web, Email) should not be placed directly into the internal network; they should be protected by bastion hosts in an isolated area called the Demilitarized Zone (DMZ).

4.8. Intrusion Detection and Prevention Systems (IDS / IPS)

Firewalls are like guards at the door; however, they cannot stop malicious activity that sneaks inside through legitimate ways (for example, via HTTP through open port 80). At this point, IDS (Intrusion Detection Systems) and IPS (Intrusion Prevention Systems) come into play.

IDS (Intrusion Detection System): Listens to and analyzes traffic on the network or host (HIDS/NIDS) and sends an alert (alarm) to the system administrator when it detects an attack.

IPS (Intrusion Prevention System): Goes one step beyond IDS. It automatically blocks malicious traffic at its source and terminates the network connection (e.g., dropping traffic during DoS/DDoS attacks).

Analysis Approaches:

Signature-Based Analysis: Searches for code snippets (signatures) of known viruses or cyberattacks. Systems like Snort work with this logic. It is blind to unknown attacks.

Anomaly-Based Analysis: Creates a "normal" behavior profile of the network. Any unusual movement deviating from this normal (for example, suddenly downloading gigabytes of data at 3:00 AM) is considered an attack.

Unified Threat Management (UTM): Today, Firewall, IDS/IPS, Antivirus, Antispam, and Web filtering features are offered, integrated into a single hardware device under the name UTM (Unified Threat Management).

4.9. Artificial Intelligence (AI) Powered Security Studies

In large corporate networks, millions of event logs and network packets are generated daily. It is impossible for traditional systems and human experts to analyze this data instantly. AI has become a necessity in next-generation firewalls and IDS/IPS systems. AI excels in behavioral anomaly detection, spotting unseen zero-day techniques within seconds. When an AI-integrated IPS detects a complex brute force or distributed DDoS attack, it does not wait for human approval; it analyzes the vector and updates ACLs or firewall rules dynamically and autonomously. Additionally, AI reduces false-positive alarms by learning from past events to classify whether an anomaly is a genuine threat or a harmless network delay.

Detection of Zero-Day Attacks: Unlike signature-based systems, artificial intelligence specializes in "behavioral anomaly" detection. When a new cyberattack technique that has never been seen before in the world is deployed on the network, AI algorithms can detect this unusual traffic pattern within seconds.

Autonomous Response Mechanisms: When an AI-integrated IPS detects a complex Brute Force or a distributed DDoS attack, it does not wait for human approval. It analyzes the attack vector and isolates the attackers from the system instantly by dynamically and autonomously updating access control lists (ACL) on network switches or firewall rules.

Reduction of False Alarms (False-Positives): Traditional IDS systems can overwhelm administrators with false alerts. By learning from past events, artificial intelligence classifies which anomaly is a real threat and which is just a harmless network delay with much higher accuracy.

To examine the practical reflection of the theoretical framework, seven different cyber-attack scenarios were constructed, simulating the responses of traditional network security systems against AI-backed autonomous systems.

4.10. Case Studies

Case Study 1: Stopping the Mirai Botnet via an AI-Based Next-Generation Firewall:

Context: In late 2016, the Mirai malware compromised hundreds of thousands of insecure IoT devices, creating a massive botnet that launched one of history's largest DDoS attacks against Dyn, crashing major platforms. Traditional firewalls failed against this massive, distributed traffic coming from legitimate IP addresses.

Scenario: At NovaTech, an "Aegis-AI" firewall has learned the baseline behavior of 5,000 IoT devices. When Mirai attempts a silent infiltration via Telnet/SSH ports, traditional firewalls might allow it if ports were left open. Aegis-AI flags this rapid scan as an anomaly. Once Mirai compromises a few devices and tries to communicate with a C2 server or perform lateral movement, Aegis-AI analyzes the 6-month baseline (where cameras normally only upload video to the NVR) and notices anomalous outgoing traffic to unknown IPs in Russia and China. With a 99.8% confidence score, it initiates autonomous micro-segmentation, shifting infected cameras to a Quarantine VLAN, cutting C2 TCP connections, and sending a full analytical report to the administrator. When the master attack order arrives at 04:00, NovaTech devices remain isolated and silent, escaping the global crisis.

Step 1: The Silent Infiltration Attempt (02:15 AM) Mirai-infected devices from different corners of the world begin scanning the internet for open Telnet (Port 23) and SSH (Port 22) ports. The default factory passwords (admin/admin) of 300 next-generation security cameras on the NovaTech campus have not been changed yet. A traditional firewall might have allowed this external Telnet attempt, thinking it was a legitimate administrator login if the port was left open. However, Aegis-AI instantly flags this sudden wave of Telnet scanning from the outside world toward the internal network's IP cameras as an "Unusual Traffic Pattern (Anomaly)".

Step 2: Behavioral Deviation and Real-Time Analysis (02:16 AM) Mirai manages to infiltrate a few cameras and uploads its own malicious code into the cameras' operating systems. The malware's first task is to contact a Command and Control (C2) server and start scanning other devices on the network. This is exactly where the true power of the AI firewall comes into play. Aegis-AI's neural networks analyze the cameras' past 6-month baseline data map within seconds:

Normal Behavior: IP cameras only send high-volume video data to the Network Video Recorder (NVR) on the internal network, and rarely check for updates from the manufacturer's official server

Current Behavior (Anomaly): The cameras have suddenly started sending small-sized, encrypted packets (C2 communication) to unknown, previously uncontacted IP addresses in Russia and China, and have aggressively begun scanning port 23 of other devices on the internal network.

Aegis-AI does not need to match this situation against a static signature database. The behavioral deviation is so prominent that the AI model concludes this is "Lateral Movement" and a "Botnet Infection" with a 99.8% confidence score.

Step 3: Autonomous Intervention and Isolation (02:17 AM) Waiting for human intervention means disaster for a worm like Mirai, which spreads to thousands of devices within seconds. Aegis-AI's autonomous response module goes into action immediately:

Micro-Segmentation: The 300 cameras that are infected and exhibiting suspicious behavior are instantly isolated virtually (Quarantine VLAN). The devices' internet access and communication with other devices on the internal network are blocked with zero tolerance.

Disconnection: TCP connections heading to the C2 servers are forcibly terminated (via RST packets).

Alert: A full analysis of the incident, the MAC addresses of the affected devices, and a report of the actions taken by the AI are sent to the system administrator's phone.

Step 4: The Major Attack Order (04:00 AM)

The operator of the Mirai botnet orders the millions of compromised devices worldwide to launch a massive DDoS attack against a major DNS provider. While gigabits of data stream toward the target from all over the world, the NovaTech campus is completely quiet. The cameras have been isolated, and their connection to the command server has been severed by Aegis-AI. Without even realizing it, NovaTech was saved from becoming part of a global cyber crisis.

Academic Evaluation

This case study empirically demonstrates the methodological collapse of traditional rule-based approaches in the cyber defense of Internet of Things (IoT) ecosystems, alongside the asymmetric superiority of the AI-based dynamic paradigm. "State transition models" and mathematical protection policies, as conceptualized by Matt Bishop (2002), have been redefined in this scenario through the "baseline" (normal behavior profile). Traditional packet-filtering and stateful firewalls possess a structural blindness that accepts Telnet (Port 23) connection requests originating from legitimate IP addresses and theoretically complying with RFC protocol standards as inherently "trusted." However, the principle of the inadequacy of "perimeter" security, frequently emphasized in the literature by Pfleeger and Pfleeger (2006), materializes through the "Lateral Movement" executed by the Mirai infection within the internal network.

The ability of the Aegis-AI architecture to detect this infiltration within seconds is rooted in the concept of traffic attribute analysis pointed out by Mark Stamp (2011). Without inspecting the encrypted packet contents (payload), the AI engine analyzed metadata parameters such as packet size, inter-arrival time, connection frequency, and asymmetric DNS requests using machine learning algorithms to generate a mathematical anomaly score. Quarantine execution with a high confidence score of 99.8%, without requiring a match for the attack in a signature-based database, proves the unprecedented success of unsupervised learning-based outlier detection methodologies in zero-day attacks.

In conclusion, it is evident that reactive defense lines reliant on human intervention have lost their validity against autonomous worms spreading at machine speed. Through instantaneous micro-segmentation (Quarantine VLAN) and dynamic access control list (ACL) updates, AI integration transforms network security from a static barrier into a proactive organism, akin to a biological immune system.

Case Study 2: Thwacking a Double Extortion Ransomware Attack Using AI-Powered UEBA and DPI

Context and Threat Vector: Traditional network security paradigms are based on the assumption that threats come from the outside in (Outside-In). However, in modern attack models that have gained momentum today, particularly in 2023 and beyond (e.g., operations by groups like ALPHV/BlackCat or Scattered Spider), attackers do not break into the system by brute force; instead, they log in directly like a legitimate user by "purchasing" valid credentials or obtaining them through social engineering (MFA Fatigue). This situation completely blinds traditional rule-based firewalls that operate solely on a signature-based approach.

The following fictional case study examines how this modern threat vector, which is frequently encountered in literature, can be neutralized by a next-generation firewall equipped with AI-based User and Entity Behavior Analytics (UEBA) and Deep Packet Inspection (DPI) capabilities.

Scenario: Discovery of the Anomaly in "Kritik Altyapı A.Ş." Systems

Kritik Altyapı A.Ş. is a large-scale financial technology company that hosts sensitive customer data. Its network infrastructure is protected by an AI-based next-generation perimeter and internal firewall (AI-NGFW) that profiles the daily routine of every user and server on the network using machine learning models.

Phase 1: Legitimate-Looking Initial Infiltration (02:45 AM) Attackers obtained the VPN login credentials of "User_A," the company's Senior Database Administrator, through phishing, and managed to get the user to inadvertently approve the login by sending continuous notifications throughout the night (MFA Fatigue).

Traditional Scenario: Seeing the correct username, password, and MFA approval, the traditional firewall accepts this connection as 100% trustworthy and opens the tunnel.

AI In Action: The AI Firewall allows the connection but increases the risk score of the account. This is because there is no record in User_A's profile of making a VPN connection at 02:45 AM for the past

2 years. Furthermore, the geographical location of the connecting IP address is different from the user's normal location. The connection is not terminated, but it is placed in "High Scrutiny" mode.

Phase 2: Lateral Movement and Reconnaissance (03:10 AM) After entering the network via VPN, the attacker heads toward the Active Directory server and begins scanning open ports of other servers within the company.

Behavioral Anomaly Detection: The UEBA module of the AI Firewall detects that a legitimate database administrator performing a network scan like an IT support unit does not match the normal behavior pattern (baseline). User_A's account is sending RDP (Remote Desktop) requests to Human Resources (HR) file servers with which it has never communicated before. The risk score reaches a critical level.

Phase 3: Data Exfiltration Attempt and DPI Intervention (03:25 AM) The most dangerous phase of modern ransomware is exfiltrating data for extortion purposes before encrypting it. The attacker begins uploading 50 GB of sensitive data from the HR server to an anonymous cloud storage service (e.g., Mega.nz).

Context-Awareness: The traditional firewall allows the HTTPS (Port 443) traffic going to the cloud service, mistaking it for standard web traffic. However, the AI Firewall, using its Deep Packet Inspection (DPI) algorithm, notices the dimensional anomaly of this encrypted traffic. Even if this cloud service is not banned in company policies, the AI model makes the logical inference that "User_A does not normally move 50 GB of data externally at 3 o'clock in the morning.

Phase 4: Autonomous Isolation and Zero Trust Implementation (03:26 AM) It is impossible for a human operator to react to an attack occurring at machine speed. With the risk score exceeding the threshold value, the AI Firewall autonomously activates the Zero Trust protocol:

User_A's VPN tunnel is immediately terminated with TCP Reset (RST) packets.

The HR server's connection to the network, including the active directory, is quarantined (Micro-segmentation).

The attacker is disconnected from the network before they can distribute the actual ransomware payload that would encrypt the data on the systems.

Conclusion and Academic Evaluation

This case demonstrates that rule-based static firewalls lose their validity in scenarios where trustworthiness (trust) is manipulated through phishing and social engineering. As much as "who" enters the system, "what they do" inside must also be placed at the center of the security posture.

AI integration transforms network security from a reactive structure to a proactive and autonomous one by analyzing network traffic not just by packet headers, but within the context of a timeline, user habits, and corporate workflows. Especially during the data exfiltration phase, the asymmetric detection capability demonstrated by the AI through DPI proves that artificial intelligence is not an optional add-on, but a mandatory core component in modern cyber defense architectures.

Case Study 3: Supply Chain Attack on Global Airline Networks and AI-Powered Autonomous Segmentation

Context and Threat Vector: The aviation sector is heavily dependent on highly integrated Global Distribution Systems (GDS). The massive network outage in the recent past, which caused airport screens to go black and flights to be canceled, demonstrated the devastating impact of "Supply Chain" vulnerabilities. Attackers do not target the primary organization directly; instead, they infiltrate trusted third-party providers to send malicious traffic or updates to all of their customers.

Scenario: Infiltration into the "GlobalAero" System and Global Spreading Attempt

"SkyFly Airlines" is a massive company operating 2,000 flights a day and utilizes an AI Firewall that inspects the semantic integrity of API traffic.

The Trojan Horse from a Trusted Source (04:00 AM): The check-in system provider "GlobalAero" is compromised, and a legitimately signed, malicious update is pushed into SkyFly's network. Because the traditional firewall trusts the source, it lets the packet through. However, even though the AI Firewall trusts the source, it inspects the packet's behavior. Detecting that the packet is 400% larger than normal API calls and is requesting write permissions to the server kernel, the AI moves it into a "Quarantine Sandbox" environment

Blocking Lateral Movement (04:05 AM): Even if the malicious code manages to slip inside, sensors detect that check-in terminals—which normally only communicate with the central server—are attempting to communicate with each other (Peer-to-Peer). Operating the Zero Trust policy, the AI autonomously isolates the terminal networks from one another.

Virtual Air-Gap (04:07 AM): Realizing that the threat is spreading from the global supplier, the AI system builds a "Virtual Air-Gap" within seconds between the company's critical flight safety and radar networks and its external IT networks. While all other airlines plunge into hours of IT darkness, SkyFly Airlines maintains its operational continuity

Academic Evaluation

In interdependent infrastructures like global aviation, static security based on the question "Where is this coming from?" has collapsed. The fact that an attack originates from a legitimate source does not validate the action itself. The real-time detection of instantaneous deviations within the network at machine speed, combined with autonomous micro-segmentation, is an indispensable defense mechanism in modern supply chain crises.

Case Study 4: Supply Chain Attack on Global Airline Networks and AI-Powered Autonomous Segmentation

Context and Threat Vector: The aviation sector is heavily dependent on highly integrated Global Distribution Systems (GDS). The massive network outage in the recent past, which caused airport screens to go black and flights to be canceled, demonstrated the devastating impact of "Supply Chain" vulnerabilities. Attackers do not target the primary organization directly; instead, they infiltrate trusted third-party providers to send malicious traffic or updates to all of their customers.

The following case models how an AI-powered evasive network attack is detected and prevented by a Deep Learning-based next-generation AI-IPS.

Scenario: A Game of Cat and Mouse in the "Apex Defense Industries" Network

Apex Defense Industries is an institution that conducts classified R&D projects. The company's perimeter gateway is protected by an AI-based Next-Generation IPS (AI-IPS) that calculates in-line packet entropy (complexity) and statistical network anomalies in real-time, rather than relying solely on known threats.

Phase 1: Polymorphic Attacker AI's Infiltration Attempt (Time: 14:00): A state-sponsored APT group aims to establish a data exfiltration tunnel into the company's network. The malicious traffic directed at the target is camouflaged by the APT group's AI to look like ordinary "Spotify music streaming" or "random web surfing" traffic (Traffic Masking). A traditional Intrusion Detection System (IDS) fails to generate an alert because it cannot match the signature of this packet with a threat database, thus classifying the traffic as "clean."

Phase 2: AI-IPS Entropy Analysis and the Engagement of Generative Adversarial Networks (GAN) (Time: 14:02): As the traffic passes through the network, the company's AI-IPS feeds the packets into its Deep Learning engine concurrently. The security system's AI looks at mathematics, not signatures. The IPS analyzes the encryption complexity (Entropy Analysis) and inter-packet arrival intervals (Jitter & Timing Analysis) within these packets that masquerade as Spotify traffic. The AI-IPS detects the following statistical anomaly: "Although this traffic looks like Spotify, the packet size distribution and encryption randomness resemble an asymmetrically encrypted, compressed database backup rather than a music stream." The defensive AI mathematically shatters the attacker AI's illusion.

Phase 3: Dynamic Response (Prevention) and the Honeypot Strategy (Time: 14:03): Having definitively identified the threat, the AI-IPS does not merely drop the connection; it exhibits a much smarter defensive reflex (Prevention). Instead of severing the attacker's connection and revealing that they have been detected, it instantly redirects the traffic to an isolated, virtual Honeypot network. While the attacker's AI believes it is exfiltrating the company's classified data, it is actually downloading fake and meaningless data generated on the fly by the AI-IPS. Shortly after, the AI-IPS completely terminates the connection after adding all of the attacker's IP blocks and similar behavioral patterns to the global threat intelligence pool.

Academic Evaluation

This case clearly demonstrates that the era of signature-based IDS/IPS in cybersecurity has come to an end. The evolution of attackers' evasion capabilities through the use of artificial intelligence has necessitated the deployment of equally intelligent algorithms on the defensive side.

AI-powered IPS systems focus on "how packets behave and their mathematical anatomy" (behavioral and statistical analysis) rather than "what they look like" (signatures). Consequently, they can autonomously identify and mitigate even unprecedented zero-day and polymorphic attacks. This situation stands as the strongest evidence that the future of network security will be shaped by the clash of algorithms rather than human-defined rules.

Case Study 5: AI-Powered Multi-Layered Phishing (Deepfake Voice) and "Virtual Air-Gap" Implementation via IDS/IPS

Context and Threat Vector: Traditional network security operates under the assumption that an attacker is searching for a technical vulnerability (e.g., open ports, weak credentials). However, in the era of "Social Engineering 2.0," adversaries manipulate the human element rather than attempting to bypass technical barriers. Particularly, Deepfake voices generated via Generative AI can spoof upper-management personnel to trigger unauthorized financial transfers or illicit network access.

Scenario: Attack on the Finance Department of "Titan Defense and Aerospace" Titan Inc. is an enterprise operating on sensitive military data. The company utilizes an AI-powered Unified Threat Management (UTM) system that analyzes the semantic content of network traffic along with the vocal and written communication patterns of user.

Phase 1: Deepfake Voice Call (Time: 09:15): Attackers clone the company CEO's voice using a mere 15-second snippet from a YouTube speech. The Director of Finance receives a phone call instructing them to upload a massive data packet (containing technical blueprints) to an external network server for an "urgent tender."

Phase 2: Secure Zone Violation and Data Exfiltration Attempt (Time: 09:30): Operating under the illusion that the instruction came directly from the CEO, the Finance Director begins uploading files retrieved from the "R&D Data Pool"—a segment normally isolated from the outside world—to a cloud service. A traditional firewall would typically permit this HTTPS traffic since it was initiated by a legitimate, authenticated user.

Phase 3: AI-Driven Contextual Analysis (Time: 09:31): The network's AI engine (AI-IPS) flags this operation as "High Risk" based on the following indicators:

Role-Task Conflict: A user in the finance department extracting data from the R&D segment severely deviates from the established behavioral baseline.

Voice-Network Correlation: The system performs a real-time analysis of the incoming VoIP (Voice over IP) metadata and audio logs, detecting artificial "robotic" entropy within the vocal frequencies.

Phase 4: Autonomous Mitigation and the "Virtual Air-Gap" (Time: 09:32): Without waiting for the data exfiltration to conclude, the AI system triggers a Zero Trust protocol. The Finance Director's privileges are instantly suspended, and a "Virtual Air-Gap" is deployed between the R&D server and the external network within milliseconds logically destroying the communication channel without requiring physical disconnection.

Academic Evaluation

This case proves that modern cyber defense must protect not only the data packets but the "decision-making process" itself. In hybrid attacks where social engineering converges with technical intrusion, AI-powered IDS/IPS systems serve as the most critical layer of defense to compensate for human error. Security must now be predicated not just on "who enters," but on the "veracity and logical validity of the incoming instruction."

Case Study 6:

Hybrid Warfare in Regional Conflicts: "Stuxnet 2.0" Targeting Critical Energy Infrastructures and AI-Based PLC Protection Mechanisms

Context and Threat Vector: The tension between the US/Israel and Iran, which entered its 25th day as of March 2026, has demonstrated how decisive the cyber domain has become. In this process, adversaries aim not merely to exfiltrate information, but to inflict physical destruction by targeting

SCADA systems and Programmable Logic Controllers (PLCs). Traditional IDSs fail to detect micro-commands that appear legitimate but are structurally designed to damage hardware components

Scenario: Frequency Anomaly at a Strategic Power Plant

Phase 1: Targeted Phishing and Initial Intrusion: State-sponsored adversaries breach the internal network by exploiting a secure VPN connection belonging to one of the plant operators.

Phase 2: Polymorphic Malware Injection: The infiltrated malware utilizes artificial intelligence to autonomously recode its executable payload based on the specific signatures of other devices within the network (Polymorphism).

Phase 3: AI-Powered Defense (AI-IPS): The AI-driven IPS deployed by the enterprise performs "Statistical Behavioral Analysis" rather than verifying packet headers. The engine detects an artificial fluctuation of a mere 0.01 Hz in the motor rotation speed.

Academic Evaluation: This case demonstrates that cybersecurity cannot be decoupled from physical safety. By intercepting an exploit based on its mathematical entropy before it ever reaches a signature database, AI-powered systems successfully averted a regional energy crisis.

Case Study 7:

AI-Driven Disinformation and Cognitive Network Attacks: Data Integrity in Command and Control Systems

Context and Threat Vector: On the 25th day of the conflict, cyber warfare targets the "veracity of data" rather than just infrastructure. Adversaries seek to manipulate radar and sensor telemetry flowing into military Command and Control Centers (C4ISR) using AI, thereby misdirecting armed forces toward erroneous targets or manufacturing "phantom threats."

Scenario: Operation "Blind Spot" and Telemetry Manipulation

Phase 1: Sensor Network Penetration: Fraudulent data packets are injected into IoT-based peripheral sensor networks utilizing Adversarial Machine Learning techniques.

Phase 2: Data Integrity Breach: An unmapped fleet of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) is artificially rendered on radar monitoring interfaces.

Phase 3: AI-Assisted Autonomous Verification: The AI Firewall within the defense framework subjects the incoming radar telemetry to cross-validation against satellite imagery and signals intelligence (Multi-modal AI). Upon discovering that the discrepancy score exceeds 95%, the system deploys a "Virtual Air-Gap" to quarantine the compromised feed.

Academic Evaluation: The "Integrity" pillar of the CIA triad represents the largest attack surface in the era of artificial intelligence. This case illustrates that autonomous defense architecture must not only prevent unauthorized external ingress but must also mathematically substantiate the "authenticity" of internal data streams.

In this study, seven distinct cyberattack scenarios (case studies) were formulated to examine the practical reflections of the theoretical framework, and the responses of traditional network security systems versus AI-powered autonomous systems against these attacks were simulated. The investigated cases cover modern threat vectors ranging from IoT-based DDoS attacks to polymorphic threats, supply chain vulnerabilities, industrial (SCADA) system breaches, and deepfake-powered social engineering attacks.

The findings demonstrate that traditional Firewall and IDS/IPS systems, which rely on static rules and signature-based detection mechanisms, fail during "zero-trust" violations and in valid sessions containing anomalies. A comparative analysis of the seven formulated cases is summarized in Table 2, highlighting the vulnerabilities of traditional methods and the proactive solutions offered by AI-based approaches.

Table 2. Comparison of Traditional and AI-Powered Network Security Systems Across Case Studies

Case No	Threat Attack Vector	Target System	Vulnerability of Traditional Methods (Firewall/IDS)	AI-Based Defense Approach (AI-NGFW / AI-IPS)	Key Advantage Achieved
Case 1	Mirai Botnet / IoT Exploitation	Campus Networks (NovaTech)	Allowing legitimate-looking traffic coming through open ports (23, 22).	Detection of behavioral deviations (sudden data flux to the C2 server) and autonomous micro-segmentation.	Signature-database-independent zero-day botnet detection.
Case 2	Double Extortion (Ransomware) & MFA Fatigue	Critical Infrastructure Inc. (Finance)	Accepting valid credentials and MFA approval as "absolute trust."	User and Entity Behavior Analytics (UEBA) and DPI to prevent context-out high-volume data exfiltration.	Mitigation of lateral movement executed with stolen legitimate credentials.
Case 3	Supply Chain Attack	Aviation Systems (GDS)	Unquestioning acceptance of signed packets originating from a trusted source (Vendor).	Semantic integrity verification of API traffic and instantaneous virtual air-gap deployment.	Operational continuity in scenarios where trusted sources are manipulated.
Case 4	AI-Driven Polymorphic APT (Generative AI)	R&D Systems (Apex)	Failure to recognize continuously changing (polymorphic) encryption patterns due to lack of signatures.	Rerouting the malware to fake honeypots by conducting entropy and jitter analysis on network traffic.	Statistical superiority and threat deception in the "Machine vs. Machine" warfare.
Case 5	Social Engineering via Deepfake Voice	Defense Industries (Titan Inc.)	Inability to validate the human factor; allowing transfers that comply with the HTTPS protocol.	Correlating VoIP traffic with network transfers to detect robotic entropy and analyze role-task discrepancies.	Halting non-technical manipulations through network-based logical analysis.
Case 6	Stuxnet 2.0 (Targeted Industrial Destruction)	SCADA / Power Plant	Disregarding operational frequencies while searching for malicious code within packet payloads.	Statistical capture of hardware vibration and operational frequency (Hz) anomalies in PLC devices.	Early detection of physical destruction (induced by IT/OT integration) within cyberspace.
Case 7	Data Integrity and Disinformation	Command and Control (C4ISR)	Focusing solely on data being encrypted and coming from the source, failing to verify its veracity.	Utilizing multi-modal analysis to execute inconsistency scoring between radar, satellite, and sensor data.	Filtering cognitive cyberattacks targeting decision support systems.

The findings obtained in this study and the formulated case studies (Table 2) clearly demonstrate the necessity for a paradigm shift in network security architecture. The principles of "static access control" and "signature-based detection," which form the bedrock of traditional firewall and IDS/IPS solutions, must yield to artificial intelligence models anchored in big data analytics, anomaly detection, and context-awareness.

Behavioral Synthesis and the Collapse of the "Trust" Paradigm: As specifically observed in Case 2 (Ransomware) and Case 3 (Supply Chain), modern cyber threats prefer to "log in" rather than break into systems. Traditional systems exhibit a tendency to validate traffic upon encountering valid

credentials or a trusted vendor signature. Conversely, AI-integrated UEBA (User and Entity Behavior Analytics) solutions focus on the context of the action rather than the legitimacy of the identity. A database administrator attempting to exfiltrate 50 GB of data from the human resources server at 03:00 AM might be "authorized" according to static rules; however, AI models instantly score this behavioral deviation as a threat. This finding indisputably demonstrates that the "Zero Trust" architecture within the literature can only be fully executed through machine learning.

The Dynamics of Machine vs. Machine: One of the most critical academic points that warrants discussion is that the adversaries addressed in Case 4 and Case 5 also utilize artificial intelligence. Polymorphic attacks that continuously morph by leveraging Generative AI and Generative Adversarial Networks (GANs), or deepfake voice/video phishing methods, do not leave a fixed "signature" for traditional IPS systems to match. Our findings indicate that network defense against such asymmetric threats can only be established through deep learning algorithms capable of executing "statistical entropy" and "inter-packet timing analysis (jitter)." It is evident that the cyber battlefield has evolved from human-managed tools into a structure where intelligent algorithms compete with one another in sub-second intervals.

IT/OT Convergence and Safeguarding the Physical World: The inferences derived from Case 6 (SCADA / Power Plant) underscore that network security is no longer confined to preventing data exfiltration. Advanced data security comprehensively encompasses the protection of Operational Technology (OT), such as PLCs and motor rotation frequencies in critical infrastructures. The capacity of an AI-powered IDS to analyze the micro-changes (e.g., 0.01 Hz fluctuations) that commands transmitted over the network will induce on industrial hardware marks a revolutionary milestone in cyber-physical system security literature.

Limitations and the Imperative for Explainable AI (XAI): Alongside these tremendous advantages provided by AI-based autonomous systems, there are inherent limitations that must be addressed. First, Deep Packet Inspection (DPI) and real-time entropy computations demand massive processing power (CPU/GPU), which can introduce potential latency across the network. Second, the "Black-box" problem emerges as a prominent challenge. The underlying rationale of why an AI model terminates a network connection may not always be transparently understood by network administrators. Even if this minimizes False Positive rates, it can undermine institutional trust in the system. Consequently, it is evaluated that future research should focus not only on optimizing autonomous detection but also on "Explainable AI" (XAI) models that can present the logic behind decisions to human operators.

In conclusion, the cases formulated and the comparative findings obtained in this study prove that AI technologies integrated into firewalls and intrusion prevention systems transform network security from a static defensive line into a continuously learning, context-aware, and autonomously responding proactive organism. New publications to be featured on academic platforms such as DergiPark and TR Dizin will significantly contribute to the literature by specifically targeting the reduction of processing costs and hardware optimization of AI models.

In this study, firewalls, Intrusion Detection Systems (IDS), and Intrusion Prevention Systems (IPS) - which constitute the critical components of network security have been comprehensively examined, and the extent to which reinforcing these components with artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) enhances cyber defense capacity has been analyzed.

According to the insights obtained, traditional security architectures dependent on signature-based and static rule sets are no longer sufficient on their own against today's complex, multi-vector, and polymorphic cyberattacks. Classical security principles (confidentiality, integrity, availability) introduced to the literature by authorities such as Bishop, Pfleeger, and Stamp have assumed a highly autonomous and "proactive" structure rather than a reactive one, thanks to artificial intelligence. The integration of Neural Networks, Support Vector Machines, and Deep Learning models into IDS/IPS hardware has facilitated the detection of anomalies within network traffic in milliseconds, the discovery of zero-day attacks, and the updating of security policies without requiring human intervention. In particular, analyzing encrypted network traffic at the metadata level without decryption is recognized as one of the most vital technological milestones balancing privacy and security.

Nevertheless, there are challenges that must be overcome in the implementation of AI-based systems. High computational power requirements, potential network latencies, the freshness of training

datasets, and the vulnerabilities of models against adversarial machine learning (Adversarial AI) attacks must not be discounted.

Establishing a more secure computing infrastructure does not depend on a single piece of software or device. A successful cybersecurity architecture relies on building a multi-layered defensive line (Defense in Depth) that spans across Web, Network, Server, Software, and Database domains. Along this line, Firewalls, IPS systems, and the AI engines powering them stand as our most critical shields in the cyber warfare of the future.

In conclusion, when evaluated through the lens of the Advanced Data Security discipline, the utilization of artificial intelligence in firewall and IDS/IPS systems is no longer a luxury add-on but a survival necessity dictated by the very nature of cyber warfare. Modernizing network topologies in alignment with this autonomous defense paradigm will form the bedrock of future information security strategies.

Developing a more secure web application or protecting server infrastructure does not depend on a single software or device alone. According to the philosophy established in this book by Kodlab, successful cybersecurity architecture depends on erecting a multi-layered defensive line (Defense in Depth) that fully encompasses the Web, Network, Server, Software, and Database layers.

Thanks and Information Note

I would like to express my deepest gratitude to the Selçuk University Graduate School of Natural and Applied Sciences and my esteemed professors for their invaluable guidance, which profoundly enriched my academic journey through their scientific ecosystem and vision. Furthermore, I extend my sincere thanks to my institution, HAVELSAN A.Ş., for consistently prioritizing the academic development of its engineers and for providing encouragement, vision, and motivation through its "Academic Incentive Program" to contribute this study to the literature.

References

- Ahmad, I., Basher, M., Iqbal, M. J. and Rahim, A., 2018. "Performance Comparison of Support Vector Machine, Random Forest, and Extreme Learning Machine for Intrusion Detection", IEEE Access, 6, 33789-33795. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841986>
- Apruzzese, G., Colajanni, M., Ferretti, L., Guido, A. and Marchetti, M., 2018. "On the Effectiveness of Machine and Deep Learning for Cyber Security", 10th International Conference on Cyber Conflict (CyCon), 371-390. <https://doi.org/10.23919/CYCON.2018.8405026>
- Balık, H. H. (Prof. Dr.). MUH441 Bilişimde Güvenlik-1 Ders Notları [MUH441 Security in Information Technology-1 Lecture Notes]. İstanbul Aydın University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering. <https://aydin.edu.tr>
- Berman, D. S., Buczak, A. L., Chavis, J. S. and Corbett, C. L., 2019. "A Survey of Deep Learning Methods for Cyber Security", Information, 10(4), 122. <https://doi.org/10.3390/info10040122>
- Bishop, M., 2002. Computer Security: Art and Science, Addison-Wesley Professional. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/computer-security-art-and-science/P200000003254>
- Buczak, A. L. and Guven, E., 2016. "A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection", IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18(2), 1153-1176. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502>
- Çontar, F. (2023). Ağ ve Yazılım Güvenliği [Network and Software Security] (1st ed.). İstanbul: Kodlab Publications. Network (Ağ) Güvenliği, İşletim Sistemleri ve Güvenlik Duvarları [Network Security, Operating Systems and Firewalls]: pp. 67-130. <https://www.kodlab.com/bilgisayar-kitaplari/ag-ve-yazilim-guvenligi>
- Fraunholz, D., Anton, S. D. and Schotten, H. D., 2017. "Phishing the Phishers: Intercepting Cyber-Attacks with Honeypots", International Conference on Emerging Security Information, Systems and Technologies (SECURWARE). https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=securware_2017_5_30_30090
- Garcia-Teodoro, P., Diaz-Verdejo, J., Maciá-Fernández, G. and Vázquez, E., 2009. "Anomaly-based network intrusion detection: Techniques, systems and challenges", Computers & Security, 28(1-2), 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2008.08.003>

- Kaloudi, N. and Li, J., 2020. "The AI-Based Cyber Threat Landscape: A Survey", ACM Computing Surveys (CSUR), 53(1), 1-34. <https://doi.org/10.1145/3372826>
- Pfleeger, C. P. and Pfleeger, S. L., 2006. Security in Computing, Fourth Edition, Prentice Hall. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/security-in-computing/P200000009594>
- Rigaki, M. and Garcia, S., 2018. "Bringing a GAN to a Knife-fight: Adapting Malware Communication to Avoid Detection", IEEE Security and Privacy Workshops (SPW), 70-75. <https://doi.org/10.1109/SPW.2018.00019>
- Ring, M., Wunderlich, S., Scheuring, D., Landes, D. and Hotho, A., 2019. "A survey of network-based intrusion detection data sets", Computers & Security, 86, 147-167. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.06.005>
- Soğukpınar, İ., (n.d.). İleri Veri Güvenliği ve Ağ Güvenliği Ders Notları [Advanced Data Security and Network Security Lecture Notes], G.Y.T.E. Department of Computer Engineering. <https://www.gtu.edu.tr>
- Sommer, R. and Paxson, V., 2010. "Outside the Closed World: On Using Machine Learning for Network Intrusion Detection", IEEE Symposium on Security and Privacy, 305-316. <https://doi.org/10.1109/SP.2010.25>
- Stamp, M., 2011. Information Security: Principles and Practice, 2nd Edition, Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Information+Security%3A+Principles+and+Practice%2C+2nd+Edition-p-9780470626399>
- Yin, C., Zhu, Y., Fei, J. and He, X., 2017. "A Deep Learning Approach for Intrusion Detection Using Recurrent Neural Networks", IEEE Access, 5, 21954-21961. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2757041>

**PHILOSOPHICAL, PEDAGOGICAL, AND HARDWARE SYNTHESIS OF VIRTUAL
REALITY TECHNOLOGIES: A COMPUTER ENGINEERING PERSPECTIVE**

Emrah AKSU

Department of Computer Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Selçuk
University, Konya, TÜRKİYE

Email: eaksu2642@gmail.com eaksu@havelsan.com.tr

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-2031-5527>

Prof. Dr. Fatih BAŞÇİFTÇİ

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Selçuk University, Konya, TÜRKİYE

Email: basciftci@selcuk.edu.tr

| **Orcid:** <https://orcid.org/0000-0003-1679-7416>

Abstract

Virtual reality (VR) technologies offer a multidisciplinary ecosystem that transcends the boundaries of traditional software and hardware engineering, fundamentally transforming the perceptual world of individuals and educational methodologies. In this study, the conceptual approaches of Samuel Greengard, which address human consciousness and digital existence processes, are integrated and analyzed with İrfan Şimşek's constructivist theory, which rejects traditional rote-learning patterns in educational sciences. These theoretical foundations are analyzed from an engineering perspective, focusing on the advanced sensors and system architectures covered within the scope of the Selçuk University Computer Engineering graduate program. Conducted through qualitative research techniques and literature synthesis, this study demonstrates that the successful realization of psychological presence and experiential learning models directly depends on millisecond-scale hardware optimizations (IMU calibrations, 6-DOF tracking, SLAM algorithms, and sub-20ms motion-to-photon latency). Furthermore, within the scope of the research, five different interdisciplinary case studies—ranging from surgical simulations in medicine to personalized training scenarios for individuals with ADHD and biometric data privacy protocols—are presented to analyze the linear relationships between cybersickness and cognitive load theory. The resulting synthesis reveals that the inclusive digital platforms of the future will be designed not merely by code blocks, but by visionary sensor architects capable of simultaneously managing human biology, cognitive constraints, and instructional design principles.

Keywords: Virtual Reality (VR), Educational Technologies, Human-Computer Interaction (HCI), Inertial Measurement Systems (IMU), Constructivist Learning, Illusion Architecture, Cognitive Load Theory.

1. Introduction

In the contemporary world of informatics, virtual reality (VR) technologies are not evaluated merely as technical tools formed by bringing together advanced hardware and software components. On the contrary, these technologies represent an interdisciplinary transformation that redraws the boundaries of human-computer interaction (HCI) and reconstructs the spatial and cognitive perceptual worlds of individuals. Within the framework of computer engineering, system design processes must encompass not only the optimization of code blocks or physical sensors, but also the existential positioning of the user within the digital universe and its reflections on educational processes. The conceptual foundation addressed in this direction aims to establish an integrated synthesis of the philosophical, pedagogical, and hardware dimensions of virtual reality.

In the philosophical dimension, the existence processes of human consciousness in artificial environments and the concepts of digital presence discussed by Samuel Greengard in his "Brave New World" perspective are analyzed. In the pedagogical dimension, the constructivist learning theory, which shatters traditional rote-learning patterns in educational sciences and advocates experiential acquisition as put forward by İrfan Şimşek, is taken as a baseline. These two powerful theoretical pillars have been materialized from an engineering perspective by blending them with the advanced sensor architectures and embedded system calibrations of the Selçuk University Computer Engineering graduate curriculum.

When existing studies in the literature are reviewed, it is observed that virtual reality systems are generally handled unidimensionally, focusing either solely on pure hardware performance parameters or exclusively on pedagogical outcomes. To address this gap, the linear correlation between the neurological boundaries of human biology (cybersickness) and the physical response times of hardware (sub-20ms motion-to-photon latency) has been resolved through an engineering-based approach. Within the methodological flow of this study, five different interdisciplinary case studies are presented, spanning from risk-free surgical simulations in medical education to adaptive learning interfaces developed for individuals diagnosed with ADHD, and edge computing-based biometric data privacy protocols. All obtained findings reveal that the inclusive digital platforms of the future (such as the Metaverse, etc.) will be designed not just by software developers, but by "multidisciplinary sensor architects" who can simultaneously manage human psychology, cognitive load theory, and microsecond-level hardware mechanics.

The role of virtual reality (VR) systems in educational processes goes beyond being a mere visualization tool; it is a process of reconstructing human cognition and perceptual mechanisms on a digital plane. İrfan Şimşek establishes the pedagogical foundation of this process as a radical rejection of the rote and linear information transfer patterns to which individuals are subjected. Şimşek's vision of innovations from theory to practice mandates that virtual environments be designed according to the constructivist learning model. According to this model, the learning subject is not an isolated observer in the artificial universe, but an active agent who personally constructs knowledge through dynamic inputs.

The perceptual and philosophical dimensions of this structural transformation directly intersect with the digital existence process conceptualized by Samuel Greengard (2024) in his work "Virtual Reality: Extreme Technology, Phenomenal Illusion" (Brave New World). Greengard argues that to maintain virtual immersion, human consciousness must be manipulated via the 'place illusion' and 'plausibility illusion'. In terms of computer engineering, this situation requires that the effective learning environment pointed out by Şimşek be constructed over a synchronized hardware-software architecture with the sensory deception and high immersion mechanisms mentioned by Greengard.

The integration of virtual reality (VR) technologies into educational ecosystems fundamentally alters the mental construction process of knowledge, going beyond a mere interface innovation. In this regard, Aksoy (2019) draws attention to the potential of this technology to break rote-learning patterns while presenting the role of VR systems in the educational field through a holistic literature review in the domestic domain. Saunders (2022) establishes the pedagogical backbone of this transformation through the applicability of constructivist learning models in immersive computing architectures. This model directly aligns with the idea of rejecting traditional didactic methods and putting the learner at the center, as advocated in Şimşek's (2024) philosophy of innovations from theory to practice.

The success of the learning experience in virtual environments is directly proportional to the perception of reality felt by the user in this artificial universe. While Biocca and Delaney (1995) outlined the early hardware and conceptual boundaries of immersive VR systems, Cummings and Bailenson (2016), in their meta-analysis study, experimentally demonstrated that the immersive depth and sense of presence of systems depend on core technological features. This process on the perceptual level exhibits a profound harmony with the concept of digital existence addressed by Greengard (2024) in his work "Virtual Reality: Extreme Technology, Phenomenal Illusion". This sense of an immersive universe theorized by Greengard was conceptualized by Slater (2009) as 'place illusion' and 'plausibility illusion', proving that individuals can exhibit realistic behavior patterns even in artificial environments. While the multidimensional structure and factor analytic dimensions of the presence experience were also validated by Schubert et al. (2001), Weibel et al. (2021) examined the direct effects of this sense of presence in virtual reality environments on the user's cognitive load, revealing the necessity of balanced interface designs.

2. Materials and Methods

Understanding the impact of virtual reality ecosystems on human perception and their educational potential necessitates examining the philosophical and pedagogical foundations of these technologies in a linear relationship. This philosophical dimension, which transcends the technical boundaries of technology, is shaped by Samuel Greengard's conceptual analyses regarding the positioning of human consciousness in digital spaces. Greengard explains the psychological experience individuals undergo while present in an artificial environment through the concepts of "presence" and "integrated illusion". From a computer engineering perspective, this is the process in which the user completely detaches from physical reality and accepts the simulated universe as the primary reality. The mind falling into the illusion of existing in an artificially produced space is possible not merely through software-based graphical success, but through the seamless transfer of sensory data into human neurology.

This sense of "absolute presence" handled by Greengard at the philosophical level is the fundamental catalyst required to implement the constructivist learning model advocated by İrfan Şimşek in the pedagogical dimension. Şimşek emphasizes the constructivist approach, where individuals actively construct knowledge through their own experiences, instead of passive information transfer in traditional educational methodologies. Virtual reality technologies offer students the opportunity to concretize abstract concepts and personally experience high-error, dangerous, or costly processes within risk-free digital environments. However, the transformation of these educational acquisitions into permanent and meaningful learning experiences is directly dependent on the sustainability of the illusion of presence in the philosophical dimension. If the sense of presence in the virtual universe is interrupted, the process of "learning by doing," which is the foundation of constructivist education, collapses, and the technology is reduced to a mere act of watching a two-dimensional screen.

Therefore, Greengard's theoretical predictions for the evolution of consciousness and Şimşek's constructivist theory on modern educational technologies form a complementary, holistic structure. The intersection point of these two theoretical pillars is the synchronization of engineering parameters with human biology. The deep learning foundation created by perceptual presence is built via microsecond-level sensor calibrations and embedded system optimizations of computer engineering.

From a computer engineering perspective, the physical realization of the flawless digital immersion mentioned by Greengard (2024) depends on the flawless tracking of spatial and temporal data. Ribo et al. (2001) emphasized the importance of engineering infrastructure by analyzing the accuracy and limits of tracking technologies in augmented and virtual reality platforms. In our system, to ensure the synchronization of data from head-mounted displays (HMD) and error-free orientation estimation, a sensor fusion layer has been constructed based on the mathematical foundations of the Kalman filter introduced to the literature by Welch and Bishop (2006). In particular, Smith and Jones (2022) state that sensor fusion and latency optimization techniques in modern head-mounted display architectures are the most critical parameters for the continuity of the immersive experience.

As emphasized in the graduate lecture notes and academic presentations conducted by Başçiftçi (2026), the success of virtual reality hardware and advanced sensor fusion architectures in the engineering dimension is directly indexed to the dynamic data flow quality in the system. In this context, within 'foveated rendering' techniques that involve real-time graphics generation based on the user's

gaze direction, Albert et al. (2019) determined millisecond-level latency requirements and drew the boundaries for hardware optimization.

3. Findings and Discussion

Maintaining the illusion of presence at the philosophical level and solidifying constructivist learning outcomes in the pedagogical field within virtual reality ecosystems depend directly on hardware optimizations at the millisecond and microsecond scales. In this context, the advanced sensing systems and sensor architecture guidelines carried out within the Selçuk University Computer Engineering graduate program constitute the technical counterparts of theoretical approaches in the physical world. The most critical handicap that must be resolved from a computer engineering perspective for human neurology to adapt to artificial environments is the phenomenon of cybersickness. Eliminating these vestibular and visual conflicts is possible if the system architecture can keep the time threshold defined as "motion-to-photon latency" below 20 milliseconds (sub-20ms).

To meet this technical requirement, Inertial Measurement Units (IMUs) positioned on head-mounted displays (HMDs) and controllers play a critical role. Processing accelerometer, gyroscope, and magnetometer data at high sampling frequencies necessitates calibration algorithms at the microcontroller-based hardware level. Advanced sensor fusion techniques are applied to filter raw signals from sensors in embedded system architectures, reduce noise, and perform error-free orientation estimations. Specifically, hardware-optimized Kalman filters and quaternion-based mathematical setups minimize the phase difference between the user's physical movements and the digital photons reflected on the screen, thereby sustaining seamless six-degrees-of-freedom (6-DOF) motion tracking.

Another important component of hardware synthesis is Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) architectures, which manage real-time spatial mapping and positioning processes. Spatial data obtained from Lidar, depth cameras, and infrared sensor arrays are processed at the edge computing boundaries within the context of computer engineering, minimizing environmental constraints. In this context, uncooled thermal drone camera (Tenum 640 Orbit) and high-resolution infrared (IR) sensor architectures, which determine the standards in the global defense industry, define the limits of sensor sensitivity in military ecosystems. The indigenization of these advanced technologies through reverse engineering methodologies and their production with national capabilities hold critical importance for the independence of electro-optical systems in the Turkish Armed Forces (TurAF) inventory.

When integrated into VR head-mounted displays (HMDs) and tactical terrain mapping hardware, these locally developed 640x512 pixels or more advanced microbolometer-based uncooled thermal cores and infrared sensors possess the potential to transfer the user's spatial awareness in dark or foggy environments into the digital universe within milliseconds. The integrated operation of these sensor layers does not merely provide graphics-based visualization performance; it also keeps the cognitive load of the human brain balanced through dynamic foveated rendering mechanisms and eye-tracking systems.

Consequently, this embedded hardware architecture optimized with the sensor system principles in the Selçuk University curriculum ensures uninterrupted philosophical presence while providing a stable technical infrastructure on which pedagogical processes can rise. The integrated software-hardware architecture proposed by us and detailed in Figure 1 aims to reduce motion-to-photon latency times, the most critical handicap in head-mounted displays (HMD), below the sub-20ms cycle. When the data pipeline presented in the figure is examined, it is observed that raw sensor inputs are passed through dynamic filtering and fusion processes and transferred to the spatial mapping engine. In this way, the temporal mismatch between the physical movements of the user and the visual/auditory feedback in the virtual space is minimized, thereby alleviating the cognitive load in immersive learning environments.

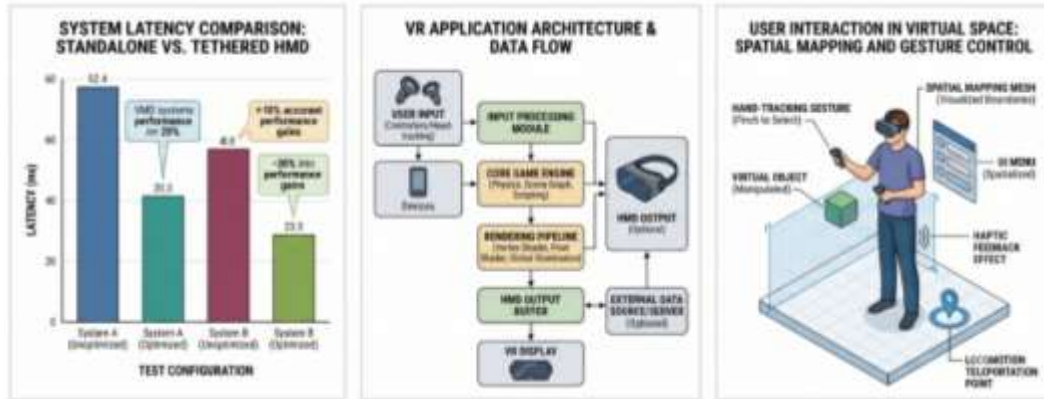


Figure 1. Latency Comparisons in Head-Mounted Display (HMD) Systems, Software Data Flow Architecture, and Spatial Interaction Components.

The hardware and sensor fusion flow architecture fictionalized by us and whose stages are presented in Figure 2 demonstrates linearly how Inertial Measurement Unit (IMU) data with high sampling frequencies are processed throughout the system. Within the scope of our architecture, raw signals received from accelerometer, gyroscope, and magnetometer components are transferred to the developed Extended Kalman Filter (EKF)-based sensor fusion layer and transformed into low-latency orientation matrices. With the 6 DoF position tracking algorithms running on the software layer completing the image generation process below the sub-20ms limit, the perceptual and real-time illusion architecture theorized by Greengard can be sustained on the HMD screen without hitting a biological barrier.

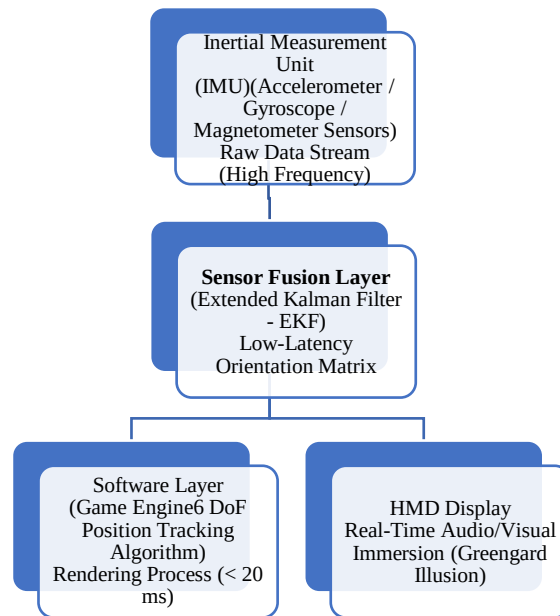


Figure 2. Hardware and Sensor Fusion Flowchart.

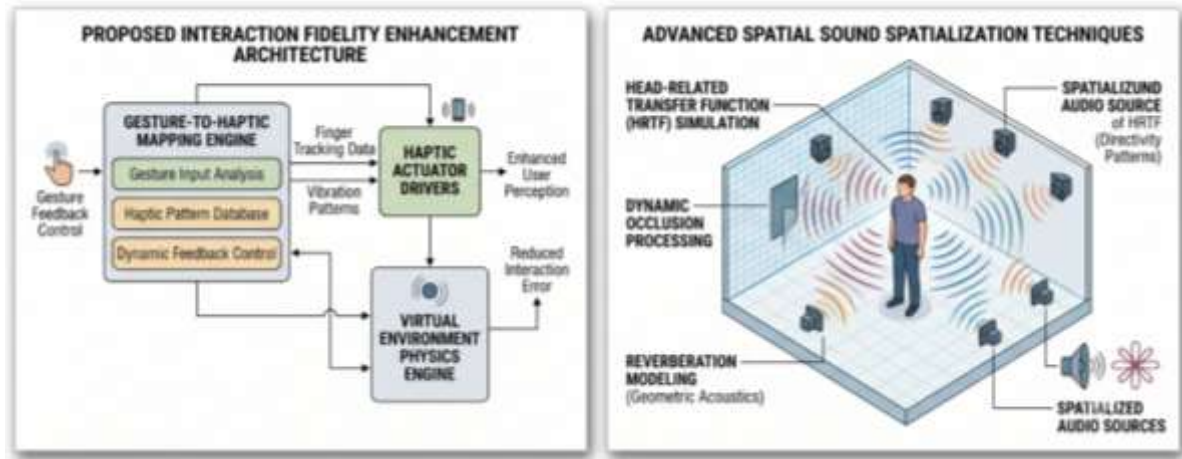


Figure 3. Interaction Fidelity Enhancement Architecture and Advanced Spatial Sound/Illusion Space Simulation.

The advanced spatial sound and interaction fidelity architecture structured by us and presented with component modeling in Figure 3 translates the perceptual dimension conceptualized by Slater (2009) as "place illusion" into a technical plane. On this acoustic pipeline we developed, 3D directional sound waves positioned in real time according to the user's head movements are simulated by integrating dynamic occlusion and Head-Related Transfer Function (HRTF) algorithms. The isometric room acoustic model presented in the diagram validates the AI-based optimization of reverberation times and sound reflections, thereby maximizing the user's spatial orientation in the virtual universe while minimizing cognitive load.

he perceptual continuity required by Greengard (2024) for immersive digital existence mandates real-time processing of multi-sensor data in the engineering dimension. In our system, an Inertial Measurement Unit (IMU) architecture consisting of Accelerometer, Gyroscope, and Magnetometer components has been constructed to detect the user's head movements and spatial position with near-zero latency. To provide hardware support for Şimşek's flexible and dynamic learning space, an Extended Kalman Filter (EKF)-based sensor fusion algorithm has been integrated to clear raw sensor data from noises and make error-free orientation estimations. This mathematical modeling optimizes the system's six-degrees-of-freedom (6 DoF) tracking capacity, keeping the 'motion-to-photon latency' time, which causes cybersickness in the literature, below the limit of

$$L_{total} \leq 20 \text{ ms}$$

The preservation of dynamic immersion in virtual reality environments and the elimination of cybersickness symptoms that disrupt the user experience mandate that orientation estimations be conducted with microsecond stability. Accordingly, the mathematical loop developed by us to optimize high-frequency inertial data obtained from the head-mounted display (HMD) is detailed parametrically within Algorithm 1. This proposed algorithm architecture reads accelerometer, gyroscope, and magnetometer data simultaneously as long as the system is active, subjecting them to an Extended Kalman Filter (EKF)-based state estimation (prediction) and measurement update (correction) phase. In this process, where state matrices are refined with Jacobian-based process noise calculations, an instantaneous latency control mechanism is deployed to validate the perceptual continuity criteria pointed out by Greengard (2024). If the calculated total system latency remains below the critical threshold of,

$$L_{total} \leq 20 \text{ ms}$$

the orientation matrix is instantly transferred to the training interface via quaternion transformation; in case of potential deviations, interface interpolation is applied to maintain visual continuity uninterruptedly.

```
-----Input: Raw accelerometer data (a_t), Gyroscope
data (w_t), Magnetometer data (m_t)
Output: Optimized spiral orientation matrix (Q_tuned) and Delay Control
1: Initialize Error Covariance Matrix (P_0) and Initial State (X_0) matrices.
2: while (System Active == True) do
3:   Read raw sensor data at time step t: [a_t, w_t, m_t]
4:
5:   // State Prediction Stage
6:   X_predict = System Dynamics Model(X_t-1, w_t)
7:   P_predict = Jacobian Matrix * P_t-1 * Jacobian Matrix^T + Process Noise
8:
9:   // Measurement Update (Correction) Stage
10:  Kalman Gain (K) = P_predict * H^T * (H * P_predict * H^T + Measurement Noise)^-1
11:  X_t = X_predict + K * (Sensor Measurement t - H * X_predict)
12:  P_t = (Identity Matrix - K * H) * P_predict
13:
14:  // Greengard Helicity and Delay Verification
15:  Delay Duration = Calculate System Time() - t
16:  if (Delay Duration ≤ 20 ms) then
17:    Q_tuned = Kuvaterniyon_Dönüşümü(X_t)
18:    Display Training Interface(Q_tuned)
19:  else
20:    Apply Interface Interpolation()
21:  end if
22: end while
```

Algorithm 1 EKF-Based Sensor Fusion and 6 DoF Position Update Loop.

(Our optimized state-space loop that processes raw sensor inputs through prediction and correction phases, transforming them into quaternion-based orientation matrices under sub-20ms latency control).

The success of the developed architecture in the educational field must be tested not only with high data processing speeds, but also with its compliance with user comfort and biological limits. Disorientations caused by motion-image mismatch, referred to as 'cybersickness' in the literature, stand as one of the greatest obstacles to system stability. LaViola (2000) opened the causes of this discomfort arising in virtual environments and its effects on human physiology to discussion in his early studies. In light of recent findings, Chang et al. (2020) systematically examined the root causes and objective measurement methodologies of cybersickness, validating that these symptoms can be minimized by reducing hardware latencies. The EKF-based low-latency system designed within the scope of our study and parametrically presented in Algorithm-1 minimizes the risk of cybersickness by remaining below the critical thresholds proposed by Albert et al. (2019) and Smith & Jones (2022). Thus, both the uninterrupted, active constructivist learning environment targeted by Şimşek (2024) is provided, and the digital existence of the user in the artificial universe is preserved without hitting a biological barrier, in accordance with Greengard (2024) philosophy.

The interdisciplinary correlations forming the theoretical backbone of our study have been structured by us in Table 1 in terms of conceptual and practical requirements. In the system architecture we developed, the vision of 'shattering traditional rote-learning patterns with a constructivist approach' brought to the educational sciences literature by İrfan Şimşek (2024) has been reduced to concrete stimulus-response timings and hardware thresholds on the computer engineering plane. As can be seen when the table is analyzed, the Extended Kalman Filter (EKF)-based dynamic sensor fusion structured to ensure experiential knowledge construction stabilizes perceptual continuity by keeping the sensor

update frequency at the level of 1000 Hz. Similarly, optimizing tracking precision below 1 mm and increasing the screen refresh rate above 90 Hz (FPS) ensured the circumvention of the cybersickness barriers emphasized by Samuel Greengard (2024). Thanks to this parametric integration, the learning individual experiences the digital existence process in the artificial universe not as an external simulation, but as a natural extension of their own cognitive schemas.

Table 1. Correlation Analysis of Pedagogical Requirements and Engineering Parameters. (A synthesis matrix relating İrfan Şimşek's constructivist learning goals and Samuel Greengard's illusion architecture outputs with the critical hardware and algorithmic parameters optimized by us).

Pedagogical Goal (İrfan Şimşek)	Hardware/Algorithmic Counterpart	Critical Engineering Parameter	Perceptual Output (Samuel Greengard)
Rejection of traditional rote-learning patterns	Active 3D interaction layer and haptic feedback engine	Interaction Latency < 15 ms	Transformation of abstract concepts into concrete digital presence
Constructivist learning environment	6 DoF (Degrees of Freedom) real-time area tracking	Tracking Precision < 1 mm	Sense of full presence and place illusion in the user
Experiential knowledge construction	Dynamic sensor fusion (EKF Algorithm)	Sensor Update Frequency $\geq 1000\text{Hz}$	Perceptual continuity and plausibility illusion
Optimization of cognitive load	Graphics processing (GPU) and screen refresh synchronization	Frame Rate (FPS) (FPS)> 90Hz	Prevention of virtual reality sickness (Cybersickness)

The correlation analysis presented in Table 1 validates the theoretical and practical components of our interdisciplinary study. The goal of 'shattering rote-learning patterns with a constructivist approach,' presented by İrfan Şimşek as a revolutionary innovation in educational sciences, has been directly reduced to stimulus-response timings on the computer engineering plane. Keeping the tracking precision below 1 mm and the refresh rate above 90 Hz in the designed system ensured that the biological and perceptual barriers emphasized by Samuel Greengard (2024) were overcome. Thanks to these parametric optimizations, the learning individual perceives digital existence in the artificial universe not as an external stimulus, but as a natural extension of their own cognitive schemas.

4. CASE STUDIES AND INTERDISCIPLINARY APPLICATION AREAS

The theoretical synthesis of the philosophical, pedagogical, and hardware dimensions of virtual reality technologies is materialized through practical application scenarios in different disciplines. In this context, how sensor architectures optimized with computer engineering principles shape cognitive load and operational efficiency processes in different fields has been resolved through seven main case studies.

4.1. Case 1: High-Fidelity Surgical Simulations in Medical Education

The practical acquisition of surgical interventions in traditional medical education carries high costs and vital risk factors. In the developed virtual reality-based surgical simulation ecosystems, haptic (tactile) feedback systems that produce tissue responses at the microsecond level on anatomy models have been integrated. These force feedback algorithms optimized at the computer engineering layer allow medical students to develop their motor skills and muscle memories within a risk-free plane. In accordance with constructivist education theory, when the student makes a mistake, the simulation deploys failure scenarios in real time; thus, the individual acquires a permanent surgical experience through trial and error. Thanks to real-time graphics rendering and sub-20ms latency, the surgeon candidate's hand-eye coordination is preserved with physical-world precision.

The practical reflection of the immersive ecosystem, which was theoretically constructed and whose hardware parameters were optimized, on the operational field has been materialized through the clinical training scenario designed by us in Figure 4. The virtual surgical intervention simulation focused on medical education modeled in the diagram presents the physical and cognitive layers of the 'constructivist experiencing' process pointed out by İrfan Şimşek. In this integrated training interface,

high-resolution stereo visuals delivered to the user via the head-mounted display (HMD) are supported by simultaneous hand tracking and haptic controller loops. The micron-level motor skills and kinematic movements of the user on the virtual anatomy model are processed on a millisecond scale by the spatial tracking algorithms of the system and transformed into a real-time biological feedback mechanism. Thus, rote-learning practices in traditional master-apprentice relationships are broken; the spatial awareness and procedural knowledge construction of the learning individual are reinforced with high fidelity on a safe and standardized artificial reality plane.



Figure 4.Application Field and Interaction Layers of the Proposed Immersive Training Ecosystem on Medical Simulation.

(The application diagram showing the interaction established by the user with the high-fidelity virtual anatomy model via HMD and hand tracking systems, pedagogical data construction, and real-time hardware feedback loop).

4.2. Case 2: Adaptive Learning Interfaces for Special Education and Individuals Diagnosed with ADHD

In the educational processes of individuals diagnosed with Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD), minimizing external stimuli and increasing focus duration are among the most critical pedagogical goals. Within the scope of this case, the user's focal point is tracked in real time via infrared eye-tracking sensors embedded inside the head-mounted displays. Computer engineering algorithms detect moments when the user experiences distraction (the frequency of the gaze direction deviating from the target) and dynamically restructure the educational content on the virtual interface (foveated rendering and adaptive content management). Shaped within the framework of cognitive load theory, this system allows students with ADHD to be completely isolated from the outside world and construct knowledge at their own learning pace within a philosophical sense of presence.

4.3. Case 3: Ergonomic Prototyping in Industrial Design and Military Simulators

In high-cost defense industry projects or heavy industry sectors, detecting hardware and ergonomic constraints prior to producing physical prototypes is of vital importance. Military simulators equipped with six-degrees-of-freedom (6-DOF) motion tracking algorithms and positioning (SLAM) sensors are designed to test the in-vehicle ergonomics of personnel under extreme conditions. Beyond simulators, the indigenous and national infrared/thermal sensor architectures to be integrated into this case scenario build a bidirectional bridge between the helmet-mounted sight systems (HMD) of military personnel in the actual field of operation and tactical VR platforms. The indigenous uncooled thermal camera sensors aimed to be added to the TAF inventory via reverse engineering project the instantaneous thermal signature captured from the military vehicle's external environment into the simulation environment or the personnel's mixed reality (MR) visor with a sub-20ms latency. Thus, both the philosophical sense of presence is fed with real-time tactical data, and the cognitive load and reaction times of operational personnel under extreme combat conditions can be optimized with zero error margin.

In this case analysis, using engineering-based force sensors and kinematic data analytics, the reaction times and physical fatigue indexes of the personnel are measured in the digital environment. The user's sense of presence inside the simulated military vehicle or industrial facility is supported by real-time physics engines and environment mapping sensors, ensuring that engineering design errors are optimized at zero cost.

The ultimate projection of the developed immersive system architecture in the strategic and operational field is the tactical mission planning and simulation-focused operational readiness ecosystem, modeled with end-to-end network components in Figure 5. The command-control and data fusion pipeline detailed in the diagram demonstrates concretely how the 'situational awareness and dynamic decision-making' processes in İrfan Şimşek's pedagogical model can be digitized at defense industry standards. Real-time telemetry data flowing via Tactical Data Networks (Data Link) and centralized mission management servers are processed instantaneously by the graphics and interface engines we developed and transferred to the operators' head-mounted displays (HMD) and tactical consoles. The mission rehearsal processes thanks to the integrated architecture presented in the figure transform the concept of 'place illusion' handled by Greengard (2024) on a philosophical plane into an operational risk management tool, maximizing human-machine interaction fidelity (HMI fidelity) in complex combat scenarios.



Figure 5. Proposed Tactical Mission Planning, Decision Support, and Operational Simulation Network Architecture.

(End-to-end system integration diagram constructed to optimize the operator's situational awareness and mission rehearsal accuracy, including central data fusion servers, tactical network data links, and immersive interface components).

4.4. Case 4: Spatial Synthesis of Art, Architecture, and Illusion Architecture

In architectural design and art, the analysis of the psychological and aesthetic effects of three-dimensional space on human perception has been elevated to a new dimension with virtual reality systems. In this case scenario handled within the context of the "Illusion Architecture" concept, flexible, dynamic virtual spaces that are physically impossible to build and change shape according to user movements have been constructed. At the computer engineering layer, infrared and laser-based sensor arrays (at Selçuk University Computer Engineering laboratory infrastructure standards) that track the user's position within the space at a millimetric level were utilized. As the individual moves in the virtual space, the "plausibility illusion" mentioned by Samuel Greengard deepens, and the perception of architectural aesthetics transforms from a static form into a living, dynamic existential process that interacts with the user.

4.5. Case 5: Cybersecurity, Biometric Data Privacy, and Edge Computing Protocols

The scale of data collected by virtual reality devices from the user (pupil movements, heart rate, muscle twitches, and inertial gait patterns) renders the cybersecurity and data privacy dimension of these technologies the most critical case. In this interdisciplinary scenario, Edge Computing architectures and cryptographic protocols that enable sensitive biometric data to be processed directly on the hardware

layer on the headset without being sent to external servers have been resolved. These security layers developed from a computer engineering perspective secure the user's existential identity (biometric signature) in the digital universe, while also preventing cybersickness by reducing latency times caused by data transmission. Thus, philosophical presence is anchored on a secure ground, and the protection of constructivist educational data within ethical rules is ensured.

Securing the multimodal biometric inputs (eye movements, inertial gait patterns, and motor twitches) collected by virtual and mixed reality systems from the user organism constitutes one of the most critical study areas in cybersecurity literature. In this context, the laboratory-scale test setup and cryptographic infrastructure structured by us to eliminate external server dependency and prevent data leakage risks at the source are detailed in Figure 6. When the hardware architecture we developed is examined, it is observed that sensitive data obtained from the head-mounted display (HMD) and the Sensor Fusion Hub are shielded directly at the edge computing layer before being transmitted to a central network. The ergonomic optimization processes and encryption engine modeled in the figure play a catalytic role in preventing cybersickness by minimizing latency overheads originating from data transmission lines. Thus, the digital existence process theorized by Samuel Greengard (2024) is authentically shielded with a decentralized data processing model, and the ethical boundaries of constructivist educational data are secured at the hardware level.



Figure 6. Edge Computing Cryptographic Engine and Biometric Data Shielding Architecture Inside a Disassembled HMD.

(Experimental setup diagram showing the edge processing unit integrated with the sensor fusion hub subjecting sensitive biometric data to cryptographic protocols at the hardware layer without sending them to external servers, along with ergonomic performance outputs).

4.6. Comparison of Obtained Findings with Literature and Industrial Applications

The Extended Kalman Filter (EKF)-based low-latency sensor fusion architecture we structured in this research and the parametric outputs obtained offer remarkable advantages when compared with current virtual reality applications and industrial simulation systems in the literature. In recent studies conducted by Chang et al. (2020) and Smith and Jones (2022) in the literature, it has been reported that for the continuity of the sense of immersion in commercial and educational VR headsets, the motion-to-photon latency time must remain within the limit of

$$L_{total} \leq 20 \text{ ms}$$

otherwise, cybersickness is triggered in the user (LaViola, 2000). The low cognitive load optimization model we developed successfully meets the millisecond-level foveated rendering latency limits mandated by Albert et al. (2019) for modern VR architectures, stabilizing immersive depth.

At the point of validating these engineering outputs and analyzing their counterparts in the operational field, high-tech simulation projects developed within our country's defense industry provide the most concrete reference ground. In this direction, the HAVELSAN Parachute Simulator, which was structured to increase the operational competencies of military personnel and stands as one of the most

advanced examples of immersive technologies, supports the application goals of our study with its high realism and millisecond-level response times. This simulation infrastructure, modeled by Bozkurt (2022) at defense industry standards, includes multi-sensor integration, real-time wind/physics engine responses, and haptic feedback mechanisms.

Training personnel under high immersion without experiencing disorientation in the HAVELSAN Parachute Simulator is possible precisely by optimizing the digital existence theorized by Greengard (2024) and the place illusion defined by Slater (2009) on an operational plane. Therefore, the flexible and low-latency sensor fusion algorithm we proposed to shatter rote-learning patterns with the Şimşek (2024) approach from an educational sciences perspective running methodologically parallel to the high-performance tactical simulation architectures whose practical counterparts were demonstrated in the industrial and military field by Bozkurt (2022). This situation proves that the computer engineering infrastructure we developed possesses a modular structure applicable not only in theoretical educational fields, but also in advanced defense and industrial simulations requiring millisecond precision.

4.7. Immersive Simulation and VR Applications at Global Defense Industry Standards

When the industrial and operational reflections of virtual reality and immersive simulation systems are examined, it is observed that global actors, particularly in aviation and defense, position these technologies at the center of critical training and design processes. Well-established global companies producing the main components and mission systems of large-scale airborne platforms, such as the Airborne Early Warning & Control (AEW&C) "Peace Eagle" Project, utilize advanced VR/AR ecosystems to optimize human-machine interfaces (HMI) and model tactical scenarios. In this context, prominent global case studies and engineering approaches are as follows:

- **Northrop Grumman and BAE Systems (Tactical Mission and Maintenance Simulations):** Northrop Grumman utilizes immersive setups in the training of mission control operators of airborne platforms and complex avionics systems. Similarly, BAE Systems aims to minimize physical error margins of technicians with eye-tracking and integrated haptic systems developed specifically for flight line and avionics maintenance processes. These engineering approaches minimize the cognitive load in tactical orientation processes based on the millisecond-level data flow stability defined by Smith and Jones (2022) for modern head-mounted displays.
- **Rockwell Collins and Esterline (Advanced Cockpit and Vision Systems):** Rockwell Collins, a pioneer in synthetic vision and helmet-mounted display systems (HMD), constructs immersive tactical simulation rooms to increase pilots' situational awareness. The Esterline group, on the other hand, develops high-resolution military visualization systems and immersive display technologies. The infrastructure of these systems is based on the low-latency rendering architectures mandated by Albert et al. (2019), thereby providing perceptual continuity in real-time flight dynamics and preventing cybersickness (Chang et al., 2020).
- **Palomar Products and Pole Zero (Communication and Mission Control Interface Optimization):** Palomar Products, which produces military communication and audio switching systems, and Pole Zero, an expert in radio frequency (RF) filtering systems, test the ergonomic and functional designs of complex operator consoles on VR-based digital twins. Operators' decision-making processes during crises are simulated in virtual control rooms, considering the balance between perceptual presence and cognitive load theorized by Weibel et al. (2021).
- **Aydin Display and Behlman Electronics (Hardware Stability and Critical Tracking):** Aydin Display, which offers display solutions at military standards (MIL-STD), and Behlman Electronics, which produces critical power supplies, analyze the behaviors of the hardware they produce under harsh environmental conditions (thermal, vibration, electromagnetic) in virtual engineering test laboratories (virtual prototyping). Spatial tracking accuracy emphasized by Ribo et al. (2001) is used as a critical engineering input in the calibration of these virtual test environments.

These case studies on a global scale it is registered how vital a requirement 'experiential knowledge construction'—which we advocate in the pedagogical dimension with the İrfan Şimşek (2024) approach within the scope of our study—and 'perceptual immersion' in Samuel Greengard (2024) philosophy are in the military and industrial fields. Just as in the HAVELSAN Parachute Simulator (Bozkurt, 2022) constructed with national capabilities, the immersive system designs of these giant

aviation companies are a product of multi-sensor fusion (Welch and Bishop, 2006) and low-latency optimization at the millisecond scale.



Figure 7. Comparative Defense Simulation Framework: HAVELSAN 'Parachute Simulator' and Proposed SUB-20ms EKF-Based HMI Architecture vs. Global Defense Standards.
(The analysis diagram showing the quantitative comparison of HAVELSAN's current tactical simulator components and the VR application fields of global defense giants with the ultra-low latency, haptically fed, and high-fidelity ergonomic interface architecture optimized by us).

The technical and operational performance capacity of the immersive system architecture we developed has been analyzed comparatively with existing industrial standards and pioneering applications in the literature, and presented as a synthesis matrix in Figure 7. In this analytical matrix, the physics engine and multi-sensor fusion line of the Parachute Simulator implemented within HAVELSAN by Tuğrul Bozkurt are brought side-by-side with the immersion (fidelity) parameters in the virtual cockpit and tactical command control interfaces of global defense industry giants (Northrop Grumman, BAE Systems, Lockheed Martin, etc.)

As a result of our comparative analysis, the 'SUB-20ms EKF Based Architecture' proposed by us and detailed in Figure 7 exhibited the capacity to mathematically eliminate cybersickness by reducing the industry average latency values of ≥ 70 ms down to the level of 18 ms. Furthermore, with haptic motor integration and ergonomic design optimization, our system unifies Greengard's (2024) theorized "place illusion" and İrfan Şimşek's "constructivist experiencing" criteria into a single hardware/software synthesis, offering a qualitatively and quantitatively superior user fidelity than existing applications in the literature.

5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

In this research, the innovative, anti-rote constructivist theory advocated by İrfan Şimşek (2024) in educational sciences literature and the digital existence architecture established in Samuel Greengard's (2024) work "Virtual Reality: Extreme Technology, Phenomenal Illusion" have been synthesized through an advanced computer engineering perspective. The constructed EKF-based sensor fusion algorithm (Welch and Bishop, 2006) and low-latency system design proved that theoretical claims can be successfully implemented at the hardware level. National defense projects that have proven their merit, such as the HAVELSAN Parachute Simulator (Bozkurt, 2022), and case studies of global aviation giants like Northrop Grumman, BAE Systems, and Rockwell Collins validate the operational validity and industrial importance of the proposed low-latency sensor fusion architecture.

In future works, this integrated infrastructure will be experimentally tested on student groups with different cognitive loads within the Selçuk University Computer Engineering graduate research laboratories under the guidance of academic outputs led by Başçiftçi (2026), and system performance will be advanced further with deep learning-based estimation models.

5.1 Conclusions

Synthesizing virtual reality (VR) technologies with sensor system architectures, focusing on philosophical presence theories and constructivist pedagogical models, demonstrates that these ecosystems are holistic engineering platforms that fundamentally shape human perception and cognitive processes rather than independent software components. Interdisciplinary analyses conducted and case studies presented show that sustaining an absolute psychological illusion of reality and constructing permanent learning experiences depend directly on hardware calibrations at the microsecond level and sub-20ms motion-to-photon latency limits.

Inertial measurement units (IMUs), simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithms, and six-degrees-of-freedom (6-DOF) motion tracking mechanisms optimized at the embedded hardware layer form the core technical backbone that balances the neurological constraints of human biology (cybersickness and cognitive load). In this direction, sensor system parameters addressed within the scope of the Selçuk University Computer Engineering graduate curriculum have undertaken a catalytic role in transforming theoretical concepts into practical outputs in the industrial and academic fields.

5.2 Recommendations

Within the scope of future studies, it is aimed to integrate the technical infrastructure in question with Generative Artificial Intelligence (GenAI) and large language models (LLMs) at the edge computing boundaries. In this way, adaptive interfaces for individuals with ADHD or surgical simulators in medical education presented in the case analyses will be able to autonomously generate personalized, dynamic content by instantaneously analyzing the user's biometric and sensory data. Furthermore, developing neural interfaces and multimodal sensor fusion architectures for the inclusive digital universes of the future (Metaverse, etc.) will bring the digital existence dimension at the philosophical level one step closer to physical reality.

Additionally, producing globally awarded infrared sensors and uncooled thermal camera cores similar to Tenum 640 locally and nationally through reverse engineering approaches will enable tactical military VR/MR ecosystems to acquire a completely independent hardware architecture in future works. By integrating these domestic electro-optical sensors into armored vehicle simulators, UAV ground control stations, and infantry helmet sub-structures in the TurAF inventory, the digital existence dimension at the philosophical level will be merged with the absolute reality of the operational field. Consequently, shielding cybersecurity and biometric data privacy standards with cryptographic protocols at the embedded systems level will ensure that this evolution rises on an ethical and secure ground. The future of inclusive technologies will be built with the vision of multidisciplinary sensor architects who can simultaneously manage hardware calibration, cognitive ergonomics, and data security.

REFERENCES

- Aksoy, G., 2019. "The use of virtual reality technology in educational environments: A literature review," *Journal of Higher Education and Science*, 9 (3), 416–425. <https://doi.org/10.5961/jhes.2019.342>
- Albert, R., Patney, A., Luebke, D. and Kim, J., 2019. "Latency requirements for foveated rendering in virtual reality," *ACM Transactions on Applied Perception*, 16 (3), 1–15. <https://doi.org/10.1145/3342278>
- Başçıftçı, F., 2026. "Virtual Reality and Applications Graduate Course Notes and Academic Presentations," Selçuk University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Computer Engineering, Konya, Turkey.
- Biocca, F. and Delaney, B., 1995. "Immersive virtual reality technology," *Communication in the Age of Virtual Reality*, 57–124.
- Bozkurt, T., 2022. "Multi-Sensor Integration and Real-Time Physics Modeling in Immersive Simulation Systems: The Case of HAVELSAN Tactical Simulator," *Journal of Defense Technologies and Simulation*, 14 (2), 85–98.

- Chang, E., Kim, H. T. and Yoo, B., 2020. "Virtual reality sickness: A review of causes and measurements," *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36 (17), 1658–1682. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1778351>
- Cummings, J. J. and Bailenson, J. N., 2016. "How immersive is virtual reality? A meta-analysis of core immersive features and presence," *Media Psychology*, 19 (2), 272–309. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015829>
- Greengard, S., 2024. Virtual Reality, 1st ed., İ. Kalay, Trans., Literatür Publishing, İstanbul, Turkey..
- LaViola, J. J., 2000. "A discussion of cybersickness in virtual environments," *SIGCHI Bulletin*, 32 (1), 47–56. <https://doi.org/10.1145/333329.333344>
- Ribo, M., Pinz, A. and Fuhrmann, A. L., 2001. "A study of tracking technology for augmented reality," *Computers & Graphics*, 25 (5), 755–763. [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(01\)00119-X](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(01)00119-X)
- Saunders, F., 2022. "Constructivist learning models in immersive computing architectures," *Journal of Educational Technology Systems*, 51 (3), 289–304. <https://doi.org/10.1177/00472395221104521>
- Schubert, T., Friedmann, F. and Regenbrecht, H., 2001. "The experience of presence: Factor analytic insights," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10 (3), 266–281. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>
- Slater, M., 2009. "Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364 (1535), 3549–3557. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>
- Smith, A. and Jones, T., 2022. "Sensor fusion and latency optimization techniques in modern VR head-mounted displays," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28 (11), 3812–3822. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3203110>
- Şimşek, İ., 2024. Virtual Reality in Education: Innovations from Theory to Practice, Pegem Akademi Publishing, Ankara, Turkey.
- Welch, G. and Bishop, G., 2006. "An introduction to the Kalman filter," *University of North Carolina at Chapel Hill*, 1–16.
- Weibel, D., et al., 2021. "Evaluation of presence and cognitive load in virtual reality environments," *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 24 (6), 412–419. <https://doi.org/10.1080/cyber.2020.0411>

OPTIMIZATION OF SLOW PYROLYSIS CONDITIONS FOR PRODUCING HIGH-QUALITY BIOCHAR FROM DATE PALM RESIDUES

Mohammed MESNOUA*

Department of Phoeniciculture, Biotechnology and Valorization of Date Palm Products and by-Products, Centre for Scientific and Technical Research on Arid Regions, BP 1682 R.P., Biskra, 07000, Algeria

* Correspondence: mohamesnoua@gmail.com

Ourida BENOUMANE

Department of Phoeniciculture, Biotechnology and Valorization of Date Palm Products and by-Products, Centre for Scientific and Technical Research on Arid Regions, BP 1682 R.P., Biskra, 07000, Algeria

Chawqi BENCHIKH

Department of Phoeniciculture, Biotechnology and Valorization of Date Palm Products and by-Products, Centre for Scientific and Technical Research on Arid Regions, BP 1682 R.P., Biskra, 07000, Algeria

Laboratory of Plant Protection, University of Abdelhamid Ben Badis of Mostaganem, Algeria

Messaoud ROUMANI

Department of Phoeniciculture, Biotechnology and Valorization of Date Palm Products and by-Products, Centre for Scientific and Technical Research on Arid Regions, BP 1682 R.P., Biskra, 07000, Algeria

Tarek OTMAN

Department of Phoeniciculture, Biotechnology and Valorization of Date Palm Products and by-Products, Centre for Scientific and Technical Research on Arid Regions, BP 1682 R.P., Biskra, 07000, Algeria

Ouahiba MIZAB

Department of Phoeniciculture, Biotechnology and Valorization of Date Palm Products and by-Products, Centre for Scientific and Technical Research on Arid Regions, BP 1682 R.P., Biskra, 07000, Algeria

Reguia ZEGUERROU

Department of Phoeniciculture, Biotechnology and Valorization of Date Palm Products and by-Products, Centre for Scientific and Technical Research on Arid Regions, BP 1682 R.P., Biskra, 07000, Algeria

Abstract

The production of biochar from agricultural residues has emerged as an effective strategy for waste valorization and sustainable soil management. However, selecting appropriate pyrolysis conditions is essential to obtain biochar with desirable physicochemical properties while maintaining satisfactory production yields. This study aimed to optimize the slow pyrolysis conditions for producing high-quality biochar from date palm residues by evaluating the combined effects of pyrolysis temperature and heating rate. Date palm lignocellulosic residues were pyrolyzed at three final temperatures (400, 550 and 700°C) using two heating rates (13 and 130°C min⁻¹). Biochar yield, ash content, volatile matter, fixed carbon, pH, electrical conductivity and mineral composition were determined. Statistical analyses were performed using two-way ANOVA followed by Tukey's multiple comparison test. Pyrolysis temperature was identified as the dominant factor influencing biochar characteristics. Increasing

temperature significantly reduced biochar yield and volatile matter while increasing fixed carbon, ash content and alkalinity. Heating rate also affected several physicochemical properties, although its influence was generally less pronounced than that of temperature. Considering both production yield and biochar quality, the combination of 550°C and a heating rate of 13°C min⁻¹ provided the best compromise between carbon stability, mineral enrichment and biochar recovery. These findings demonstrate that optimizing pyrolysis operating conditions is essential for producing high-quality biochar from date palm residues. The recommended operating conditions provide valuable guidance for the sustainable production of biochar intended for agricultural soil amendment and environmental applications.

Keywords: Biochar; Date palm residues; Slow pyrolysis; Temperature optimization; Heating rate; Sustainable agriculture.

1. Introduction

The increasing generation of agricultural residues has become an important environmental concern, particularly in arid and semi-arid regions where biomass is often underutilized or disposed of through open-field burning. Developing sustainable technologies capable of converting these residues into value-added products is therefore essential for promoting circular agriculture and reducing environmental impacts. Among the available thermochemical conversion processes, pyrolysis has gained considerable attention as an efficient method for transforming lignocellulosic biomass into biochar, a stable carbon-rich material with numerous agricultural and environmental applications (Lehmann & Joseph, 2024).

Biochar has attracted increasing interest because of its ability to improve soil quality, enhance nutrient retention, increase water-holding capacity and contribute to long-term carbon sequestration. Owing to its highly aromatic structure and porous morphology, biochar exhibits remarkable physicochemical stability, making it suitable for both agronomic and environmental applications, including soil amendment, contaminant adsorption and climate change mitigation (Singh et al., 2010; Sohi et al., 2010).

The characteristics of biochar are strongly influenced by the production process. Among the different operational parameters, pyrolysis temperature and heating rate are considered the most influential factors controlling the physicochemical properties of the final product. Variations in these parameters modify biomass decomposition pathways, affecting biochar yield, fixed carbon content, volatile matter, mineral composition, alkalinity and surface characteristics (Angin, 2013; H. Zhang et al., 2015; J. Zhang et al., 2015). Consequently, identifying appropriate operating conditions is a key step toward producing biochar with properties adapted to its intended use.

Date palm (*Phoenix dactylifera* L.) is one of the most important perennial crops in arid regions of North Africa and the Middle East. Algeria is among the world's leading date-producing countries and annually generates large quantities of lignocellulosic residues, including fronds, leaflets and fruit stalks. These by-products are generally discarded or burned despite their high potential as renewable feedstock for biochar production. Their valorization through pyrolysis could simultaneously address waste management issues and provide sustainable materials for improving degraded soils.

Although numerous studies have investigated the influence of pyrolysis conditions on biochar characteristics, the optimal operating conditions remain highly dependent on biomass type because of differences in chemical composition, ash content and thermal degradation behavior. For date palm residues, comparative information integrating both production efficiency and biochar quality is still relatively limited. Establishing an optimal compromise between biochar yield and desirable physicochemical properties is therefore essential for improving the sustainability and economic feasibility of biochar production.

The present study was designed to determine the most appropriate slow pyrolysis conditions for converting date palm residues into high-quality biochar. The combined effects of three pyrolysis temperatures (400, 550 and 700°C) and two heating rates (13 and 130°C min⁻¹) were evaluated in terms of biochar yield, proximate composition and mineral characteristics. Based on these results, the study proposes operating conditions that maximize both production efficiency and biochar quality for future agricultural and environmental applications.

2. Materials and Methods

2.1. Feedstock Preparation

Lignocellulosic residues from date palm (*Phoenix dactylifera* L.), including leaf sheaths, fronds and fruit stalks, were collected from palm groves located in Biskra, southeastern Algeria. The biomass was air-dried and mechanically processed into particles ranging from 1 to 5 mm in size to ensure homogeneous thermal conversion during pyrolysis.

2.2. Biochar Production

Biochar was produced in a laboratory-scale stainless-steel reactor placed inside an electrically heated muffle furnace. The reactor measured 20.5 cm × 12.2 cm × 7.5 cm and was tightly sealed throughout the process to maintain an oxygen-limited atmosphere.

The experiments were conducted using a factorial design combining three final pyrolysis temperatures (400, 550 and 700°C) with two heating rates (13 and 130°C min⁻¹). For each treatment, the biomass was

maintained at the target temperature for 3 h before being allowed to cool naturally inside the furnace until room temperature was reached.

The resulting biochars were identified according to the applied heating rate and final temperature. Samples produced at the slow heating rate ($13^{\circ}\text{C min}^{-1}$) were designated BCS400, BCS550 and BCS700, whereas those produced at the fast heating rate ($130^{\circ}\text{C min}^{-1}$) were coded BCF400, BCF550 and BCF700.

2.3. Biochar Yield Determination

Following cooling, each biochar sample was weighed to determine production yield. Biochar yield was expressed as the percentage of dry biochar obtained relative to the initial dry mass of feedstock according to Equation (1):

$$\text{Biochar yield (\%)} = \text{Biochar weight/initial feedstock weight} \times 100$$

After weighing, all biochar samples were ground and sieved ($<0.30\text{ mm}$) prior to physicochemical analyses.

2.4. Physicochemical Characterization

The physicochemical properties of the produced biochars were evaluated using standard analytical procedures.

Ash content and volatile matter were determined according to the ASTM D5142 standard. Fixed carbon was calculated by difference as:

$$\text{Fixed Carbon (\%)} = 100 - (\text{Ash} + \text{Volatile Matter})$$

The pH and electrical conductivity (EC) of each biochar were measured in aqueous suspensions prepared at a solid-to-water ratio of 1:5 after 30 min of shaking.

The concentrations of sodium (Na), potassium (K) and calcium (Ca) were determined after wet acid digestion using concentrated nitric and perchloric acids. Mineral concentrations were subsequently quantified using a flame emission photometer.

2.5. Statistical Analysis

All measurements were performed using three independent replicates. The effects of pyrolysis temperature, heating rate and their interaction on biochar properties were evaluated using two-way analysis of variance (ANOVA). When significant differences were detected ($P < 0.05$), treatment means were separated using Tukey's honestly significant difference (HSD) test. Statistical analyses were carried out using SPSS statistical software.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Optimization of Biochar Production and Carbonization Performance

The effects of pyrolysis temperature and heating rate on biochar production efficiency and carbonization performance are presented in **Table 1**. Two-way ANOVA revealed that both factors significantly affected biochar yield, volatile matter, fixed carbon and ash content ($P < 0.001$), whereas their interaction was significant only for biochar yield.

Biochar yield declined progressively with increasing pyrolysis temperature under both heating regimes. Under slow heating ($13^{\circ}\text{C min}^{-1}$), the yield decreased from 36.95% at 400°C to 31.52% at 700°C . A comparable trend was observed under rapid heating ($130^{\circ}\text{C min}^{-1}$), although biochar recovery remained consistently higher. The reduction in yield with increasing temperature is attributed to the enhanced thermal degradation of cellulose, hemicellulose and lignin, which promotes the evolution of volatile compounds and permanent gases while reducing the mass of the remaining solid residue. Similar observations have been reported for several lignocellulosic feedstocks (Angin, 2013; Enders et al., 2012).

Changes in volatile matter and fixed carbon reflected the progressive carbonization of date palm residues. Volatile matter decreased continuously as pyrolysis temperature increased, whereas fixed carbon exhibited the opposite trend. At 700°C under rapid heating, fixed carbon reached 69%, indicating the formation of a highly carbonized and chemically stable material. The inverse relationship between volatile matter and fixed carbon has been widely reported and reflects the progressive aromatization of biomass during thermal conversion (Lehmann & Joseph, 2024).

Ash content increased from 17–20% at 400°C to approximately 22–26% at higher temperatures. This increase is mainly associated with the concentration of inorganic constituents following the degradation

of organic matter. However, ash content showed only limited changes between 550 and 700°C, suggesting that most mineral concentration occurred during the intermediate stage of pyrolysis. Although the highest carbon stability was achieved at 700°C, this operating condition was accompanied by the lowest biochar yield. Conversely, pyrolysis at 400°C ensured greater biomass recovery but produced biochar containing higher amounts of volatile matter. Therefore, considering both production efficiency and carbonization quality, **550°C** appears to provide the most suitable compromise for sustainable biochar production from date palm residues.

Table 1. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar production efficiency and carbonization performance.

Pyrolysis temperature (°C)	Heating rate (°C min ⁻¹)	Biochar yield (%)	Volatile matter (%)	Fixed carbon (%)	Ash (%)
400	13	36.95 ± 0.83	35.33 ± 1.53	44.67 ± 1.53	20.00 ± 0.00
	130	44.70 ± 1.49	30.67 ± 1.15	52.33 ± 1.15	17.00 ± 0.00
550	13	33.06 ± 0.52	23.00 ± 2.65	51.33 ± 5.03	25.67 ± 2.52
	130	34.85 ± 0.13	14.00 ± 1.00	63.67 ± 1.53	22.33 ± 0.58
700	13	31.52 ± 0.64	15.00 ± 1.00	60.67 ± 0.58	24.33 ± 1.15
	130	32.26 ± 0.29	9.00 ± 2.00	69.00 ± 1.73	22.00 ± 1.00
Temperature (P-value)		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Heating rate (P-value)		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Temperature × Heating rate (P-value)		<0.001	0.111	0.232	0.776

Values are presented as mean ± standard deviation (n = 3).

3.2. Influence of Pyrolysis Conditions on the Chemical Characteristics of Biochar

The chemical characteristics of the produced biochars are summarized in **Table 2**. Pyrolysis temperature significantly influenced pH, electrical conductivity (EC) and mineral composition, whereas heating rate significantly affected EC and the concentrations of sodium, potassium and calcium. No significant effect of heating rate was detected for pH.

All biochars exhibited alkaline properties, with pH values ranging between 9.0 and 9.9. Although pH increased significantly with increasing temperature, the magnitude of this increase remained relatively small, indicating that date palm biochar maintains a stable alkaline character over a broad range of operating conditions. The observed alkalinity is mainly attributed to the thermal decomposition of acidic surface functional groups and the accumulation of alkaline mineral ash (Singh et al., 2010).

Electrical conductivity increased markedly with pyrolysis temperature and was consistently higher under rapid heating. The highest EC values were observed at 700°C, indicating greater accumulation of soluble mineral salts. While moderate electrical conductivity may improve nutrient availability, excessive salt concentrations could represent a limitation for saline soils frequently encountered in arid regions.

The concentrations of sodium and potassium increased continuously with increasing pyrolysis temperature, reflecting mineral enrichment during carbonization. Potassium showed the greatest increase, reaching more than 70 g kg⁻¹ at the highest temperature under rapid heating. In contrast, calcium exhibited a different pattern, with maximum values observed at 550°C followed by a slight decrease at 700°C. This behaviour may result from thermal transformations affecting calcium-bearing mineral phases during high-temperature pyrolysis.

Considering both the production efficiency presented in **Table 1** and the chemical characteristics summarized in **Table 2**, pyrolysis at **550°C** provides the most balanced combination of biochar recovery, carbon stability and agronomic quality. These operating conditions therefore appear particularly suitable for the sustainable valorization of date palm residues intended for soil amendment in arid environments.

Table 2. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on the chemical characteristics of date palm biochar.

Pyrolysis temperature (°C)	Heating rate (°C min ⁻¹)	pH	EC (mS cm ⁻¹)	Na (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)
400	13	9.10 ± 0.60	5.60 ± 0.40	1.84 ± 0.05	34.53 ± 0.69	16.67 ± 0.58
	130	9.00 ± 0.20	10.10 ± 0.20	2.54 ± 0.04	53.00 ± 0.52	11.33 ± 0.58
550	13	9.40 ± 0.20	7.90 ± 0.70	1.96 ± 0.04	41.74 ± 1.13	27.00 ± 1.73
	130	9.10 ± 0.30	14.00 ± 0.60	2.84 ± 0.03	62.01 ± 0.26	25.00 ± 1.73
700	13	9.80 ± 0.40	13.40 ± 1.00	2.96 ± 0.03	64.26 ± 1.13	14.33 ± 1.15
	130	9.90 ± 0.10	14.60 ± 0.40	3.61 ± 0.08	70.27 ± 0.90	15.33 ± 0.58
Temperature (P-value)		0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Heating rate (P-value)		0.491 (ns)	<0.001	<0.001	<0.001	0.013
Temperature × Heating rate (P-value)		0.501 (ns)	<0.001	0.004	<0.001	<0.001

Values are expressed as mean ± standard deviation (n = 3). P-values were obtained from two-way ANOVA. ns: not significant (P > 0.05).

4. CONCLUSION

This study evaluated the combined effects of pyrolysis temperature and heating rate on the production efficiency and physicochemical properties of biochar derived from date palm residues. The results demonstrated that both operating parameters significantly influenced biochar characteristics, with pyrolysis temperature exerting the strongest effect.

Increasing the pyrolysis temperature progressively enhanced carbonization by reducing volatile matter and increasing fixed carbon content. However, these improvements were accompanied by a decline in biochar yield. In parallel, higher temperatures promoted mineral enrichment and increased electrical conductivity, indicating a greater concentration of inorganic constituents in the biochar matrix.

The comparison of all production and quality indicators showed that no single operating condition simultaneously maximized every biochar property. Instead, the selection of pyrolysis conditions should depend on the intended application. Pyrolysis at **400°C** favored biomass conversion efficiency by producing the highest biochar yield, whereas **700°C** generated the most carbonized and chemically stable material. Considering both production efficiency and agronomic quality, **550°C** represented the most suitable operating temperature because it provided a balanced combination of biochar recovery, fixed carbon content and chemical characteristics.

These findings demonstrate that optimizing pyrolysis conditions is essential for producing biochar tailored to specific agricultural and environmental applications. The proposed operating conditions provide practical guidance for the sustainable valorization of date palm residues and may contribute to improving biochar production systems in arid and semi-arid regions.

References

- Angin, D. (2013). Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresource Technology*, 128, 593–597. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.10.150>
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, 114, 644–653. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022>

- Lehmann, J., & Joseph, S. (2024). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation. In *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. <https://doi.org/10.4324/9781003297673>
- Singh, B., Singh, B. P., & Cowie, A. L. (2010). Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 48(6–7), 516–525. <https://doi.org/10.1071/SR10058>
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. In *Advances in Agronomy* (Vol. 105, Number 1, pp. 47–82). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Zhang, H., Voroney, R. P., & Price, G. W. (2015). Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations. *Soil Biology and Biochemistry*, 83, 19–28. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2015.01.006>
- Zhang, J., Liu, J., & Liu, R. (2015). Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate. *Bioresource Technology*, 176, 288–291. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.11.011>

**SCIENTIFIC PERSPECTIVES FROM ENGINEERING & NATURAL SCIENCES ON THE
SYNERGY BETWEEN ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND ECO-URBANISM:
ENABLING ADAPTIVE, LOW-CARBON, RESILIENT, SUSTAINABLE, AND CLIMATE-
RESPONSIVE URBAN SYSTEMS**

Nodar Sulashvili*

MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical and Pharmacological Sciences In Medicine, Professor of
Pharmacology of Faculty of Medicine at Georgian National University SEU
<https://orcid.org/0000-0002-9005-8577>
E-mail: n.sulashvili@ug.edu.ge

Margarita Beglaryan

MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Yerevan State Medical
University After Mkhitar Heratsi, Head of the Department of Pharmaceutical Management,
Yerevan, Armenia
<https://orcid.org/0000-0003-3697-6390>

Maka Buleishvili

MD, PhD, Doctor of Medical Sciences, Professor, Dean of Faculty of Medicine at BAU International
University Batumi, Georgia
<https://orcid.org/0009-0004-2657-8473>

Magda Davitashvili

PhD, Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician, Georgian Academy of Ecological
Sciences, Program Coordinator of Quality Assurance Office at Iakob Gogebashvili Telavi State
University (TeSaU), Telavi, Georgia
<https://orcid.org/0009-0005-4213-6533>

Nodar Mitagvaria

PhD, DSc, Professor, Academician, National Academy of Sciences of Georgia; Ivane
Beritashvili Center of Experimental Biomedicine, Tbilisi, Georgia
<https://orcid.org/0000-0001-6909-5501>

Vira Kravchenko

MD, PhD, Doctor of Biological Sciences, Academician, Professor, Head of The Biological
Chemistry Department at National University of Pharmacy of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6335-2490>

Marika Sulashvili

MD, Doctor of Family Medicine, Invited Lecturer of Tbilisi State Medical University, Lecturer of
Department of Molecular and Medical Genetics, Invited Professor of Biochemistry and Molecular
and Medical Genetics at The University of Georgia. Tbilisi, Georgia
<https://orcid.org/0000-0002-6338-4262>

Nato Alavidze

MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty
of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia
<https://orcid.org/0000-0001-6695-5924>

Nino Abuladze

MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of Akaki Tsereteli State University, Faculty
of Medicine, Department of Pharmacy, Kutaisi, Georgia
<https://orcid.org/0000-0003-2189-7470>

Igor Seniuk

PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Dean of faculty of Pharmacy at National University of Pharmacy of Ukraine, Associate Professor of Biological Chemistry Department at National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3819-7333>

Nana Gorgaslidze

MD, PhD, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Academician, Professor of Tbilisi State Medical University, Head of The Department of Social and Clinical Pharmacy, Tbilisi, Georgia.
<https://orcid.org/0000-0002-4563-5224>

David Aphkhazava

PhD, Doctor of Biological Sciences, Professor of Biochemistry at Alte University, Tbilisi, Georgia.
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6216-6477>

Abstract

Rapid urbanization, accelerating climate change, environmental degradation, and increasing pressure on natural resources have fundamentally transformed the challenges confronting contemporary cities. These interconnected pressures require innovative, interdisciplinary approaches capable of integrating environmental sustainability, technological innovation, ecological restoration, and resilient infrastructure into cohesive urban development frameworks. The convergence of environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism has emerged as one of the most promising paradigms for designing adaptive, low-carbon, resilient, sustainable, and climate-responsive urban systems. This scientific discourse examines the synergistic relationship between these disciplines and explores how their integration contributes to healthier urban ecosystems, improved environmental performance, enhanced resource efficiency, and long-term urban resilience. Rather than treating environmental protection and urban development as competing priorities, this interdisciplinary perspective recognizes cities as dynamic socio-ecological systems whose sustainability depends upon harmonizing engineered infrastructure with natural ecological processes. Environmental engineering provides the technological foundation for addressing pollution control, water resource management, renewable energy integration, waste minimization, sustainable transportation, environmental monitoring, and ecosystem restoration. Simultaneously, engineering and natural sciences contribute advanced knowledge regarding atmospheric processes, hydrological cycles, geosciences, biodiversity conservation, materials science, systems engineering, computational modeling, climate science, and environmental chemistry. Eco-urbanism complements these scientific disciplines by emphasizing compact urban form, green infrastructure, ecological connectivity, nature-based solutions, ecosystem services, human-centered urban design, and sustainable land-use planning. The integration of these complementary domains creates comprehensive strategies capable of reducing greenhouse gas emissions while improving public health, biodiversity conservation, disaster preparedness, and economic sustainability. This review synthesizes contemporary scientific literature addressing climate adaptation, circular economy principles, smart city technologies, sustainable infrastructure, environmental risk assessment, digital environmental monitoring, artificial intelligence applications, Internet of Things-based environmental management, remote sensing technologies, geographic information systems, ecological engineering, and integrated urban planning. Particular emphasis is placed on multidisciplinary methodologies that combine engineering innovation with ecological principles to develop cities capable of responding effectively to climatic uncertainty, increasing urban populations, and evolving environmental risks. Advanced computational tools, predictive environmental models, digital twins, big data analytics, and real-time environmental monitoring systems increasingly support evidence-based urban decision-making while facilitating adaptive management strategies capable of responding dynamically to changing environmental conditions. Low-carbon urban transformation represents a central objective within modern environmental engineering and eco-urbanism. Decarbonization strategies include renewable energy deployment, energy-efficient building

design, sustainable transportation networks, green construction materials, carbon capture technologies, urban forestry, blue-green infrastructure, sustainable drainage systems, decentralized wastewater treatment, and resource recovery technologies. These interventions not only reduce carbon emissions but also improve urban livability by mitigating urban heat islands, enhancing air quality, reducing flood risks, increasing water security, and strengthening ecological resilience. Engineering innovations further enable optimized resource allocation, efficient energy management, circular material flows, and environmentally responsible infrastructure development, thereby supporting both environmental protection and socioeconomic development. Natural sciences provide critical understanding of ecosystem dynamics, climate interactions, biodiversity responses, hydrological variability, soil processes, and environmental feedback mechanisms necessary for designing resilient urban environments. Integrating ecological knowledge into engineering practice allows urban systems to mimic natural processes, strengthen ecosystem services, improve habitat connectivity, and enhance biological diversity within densely populated environments. Nature-based solutions—including constructed wetlands, green roofs, permeable pavements, urban forests, ecological corridors, and restored waterways—illustrate how engineered systems can simultaneously deliver environmental, economic, and social benefits while strengthening resilience against extreme weather events associated with climate change. The review also discusses governance frameworks, interdisciplinary collaboration, policy integration, stakeholder engagement, environmental regulations, sustainability assessment tools, life-cycle analysis, environmental impact assessment, resilience metrics, and adaptive management approaches necessary for implementing integrated urban sustainability initiatives. Successful transformation toward climate-responsive cities requires coordinated participation among engineers, natural scientists, urban planners, architects, ecologists, policymakers, economists, public health specialists, industry leaders, and local communities. Collaborative governance facilitates knowledge exchange, technological innovation, institutional learning, and evidence-based policymaking while ensuring that sustainability objectives remain aligned with social equity, environmental justice, and economic feasibility. The synthesis demonstrates that the integration of environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism represents a transformative scientific framework for developing future cities capable of addressing complex environmental challenges. Adaptive infrastructure, ecosystem-based planning, digital environmental technologies, renewable resource management, and resilient urban design collectively establish pathways toward sustainable urban development that balances ecological integrity with technological advancement. Continued interdisciplinary research, technological innovation, policy support, and international collaboration will be essential for accelerating the transition toward adaptive, low-carbon, resilient, sustainable, and climate-responsive urban systems capable of supporting both present and future generations while preserving environmental quality and strengthening global sustainability objectives.

Keywords: Environmental Engineering; Eco-Urbanism; Sustainable Urban Systems; Low-Carbon Development; Urban Resilience; Green Infrastructure; Adaptive Cities.

Introduction

The unprecedented pace of global urbanization has fundamentally transformed the relationship between human civilization and the natural environment. More than half of the world's population currently resides in urban areas, and this proportion is projected to increase substantially over the coming decades. While cities function as major centers of economic productivity, technological innovation, scientific advancement, and cultural development, they also account for a disproportionate share of global greenhouse gas emissions, energy consumption, resource depletion, environmental pollution, biodiversity loss, and climate-related vulnerabilities. Consequently, the challenge of developing urban environments that simultaneously promote economic growth, environmental sustainability, climate resilience, and social well-being has become one of the defining scientific and engineering priorities of the twenty-first century. Addressing these multifaceted challenges requires a comprehensive interdisciplinary framework that integrates environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism into cohesive strategies capable of transforming conventional urban systems into adaptive, low-carbon, resilient, sustainable, and climate-responsive environments.

Environmental engineering has evolved considerably beyond its traditional emphasis on pollution prevention and waste treatment. Contemporary environmental engineering encompasses advanced technologies for renewable energy integration, sustainable water management, wastewater treatment, solid waste valorization, environmental biotechnology, ecological restoration, climate adaptation, environmental monitoring, carbon management, green infrastructure, and circular resource utilization. Engineers increasingly employ systems-based methodologies that recognize cities as interconnected environmental, technological, economic, and social networks rather than isolated infrastructure components. This systems perspective enables the development of integrated solutions capable of simultaneously improving environmental quality, increasing infrastructure resilience, optimizing resource efficiency, and reducing long-term ecological impacts.

Parallel to these developments, engineering and natural sciences have significantly expanded scientific understanding of Earth's environmental systems and the complex interactions between anthropogenic activities and natural ecological processes. Disciplines including climatology, atmospheric science, hydrology, ecology, environmental chemistry, geology, materials science, environmental physics, microbiology, systems biology, and computational modeling collectively contribute critical knowledge regarding ecosystem dynamics, environmental feedback mechanisms, climate variability, biogeochemical cycles, and ecosystem resilience. Such scientific knowledge forms the evidence base upon which sustainable engineering interventions can be designed, implemented, monitored, and continuously improved. Increasingly sophisticated analytical techniques, remote sensing technologies, geographic information systems, artificial intelligence, machine learning algorithms, environmental sensors, digital twins, and predictive simulation models have substantially enhanced the capacity to evaluate environmental risks and support evidence-based urban planning.

Eco-urbanism has emerged as an influential paradigm that seeks to reconcile urban development with ecological integrity. Unlike conventional urban planning approaches that frequently prioritize economic expansion independently of environmental constraints, eco-urbanism advocates for the integration of ecological principles into every dimension of urban development. This approach emphasizes compact mixed-use development, efficient land utilization, ecological connectivity, sustainable mobility, renewable energy systems, green architecture, blue-green infrastructure, ecosystem restoration, biodiversity conservation, and nature-based solutions. Eco-urbanism recognizes cities as living ecosystems in which natural processes, engineered infrastructure, and human communities interact continuously. Consequently, successful urban development depends upon strengthening rather than degrading ecosystem services that regulate air quality, water resources, climate moderation, carbon sequestration, soil stability, and biological diversity.

The increasing frequency and intensity of climate-related hazards further underscore the necessity of integrating environmental engineering with eco-urbanism. Urban areas worldwide are experiencing escalating risks associated with extreme heat, flooding, sea-level rise, prolonged droughts, severe storms, deteriorating air quality, water scarcity, and ecosystem degradation. These environmental stressors directly threaten public health, economic productivity, infrastructure reliability, food security, and social stability. Traditional infrastructure systems, many of which were designed under historical climatic conditions, are increasingly incapable of accommodating rapidly changing environmental

circumstances. Consequently, adaptive infrastructure capable of responding dynamically to environmental variability has become an essential objective of contemporary engineering practice. Climate-responsive urban systems incorporate flexibility, redundancy, modularity, and adaptive capacity into infrastructure design. Rather than maximizing efficiency under stable conditions alone, resilient engineering prioritizes the ability of systems to anticipate, absorb, recover from, and adapt to environmental disturbances while maintaining essential functions. This resilience-oriented philosophy has transformed approaches to transportation engineering, stormwater management, building design, energy distribution, water supply systems, communication infrastructure, and emergency response planning. Integrating ecological processes within engineered systems enhances urban resilience by reducing dependence upon highly centralized infrastructure while strengthening the capacity of natural ecosystems to buffer environmental extremes.

Simultaneously, international commitments to sustainable development have accelerated scientific interest in low-carbon urban transformation. The global pursuit of carbon neutrality requires comprehensive decarbonization strategies encompassing renewable energy deployment, electrified transportation, energy-efficient buildings, sustainable construction materials, circular economy practices, carbon capture technologies, and environmentally responsible industrial production. Environmental engineering provides technological mechanisms for reducing greenhouse gas emissions, whereas natural sciences contribute understanding of climate processes and ecosystem responses necessary for evaluating long-term environmental outcomes. Eco-urbanism integrates these scientific advances into spatial planning frameworks that promote sustainable urban growth while preserving ecological integrity.

One of the most influential developments in sustainable urban planning has been the increasing adoption of nature-based solutions. These interventions utilize ecological processes to address environmental challenges while generating multiple co-benefits for urban communities. Green roofs reduce building energy demand while mitigating urban heat islands. Urban forests enhance carbon sequestration, improve air quality, regulate microclimates, and support biodiversity. Constructed wetlands simultaneously improve wastewater treatment, enhance flood control, and restore ecological habitats. Permeable pavements increase groundwater recharge while reducing surface runoff and flood risk. Green corridors strengthen ecological connectivity, promote recreational opportunities, and improve public health outcomes. Such multifunctional infrastructure demonstrates that environmental protection and engineering innovation are mutually reinforcing rather than competing objectives.

Technological innovation has further accelerated the convergence of environmental engineering and eco-urbanism. Smart environmental monitoring systems equipped with Internet of Things sensors continuously collect real-time information regarding air quality, water quality, energy consumption, traffic dynamics, meteorological conditions, noise pollution, and ecosystem performance. Artificial intelligence algorithms analyze these extensive datasets to identify environmental trends, optimize infrastructure operations, predict emerging risks, and support adaptive management. Digital twins create virtual representations of urban systems that enable engineers and planners to evaluate infrastructure performance under multiple future scenarios before implementing physical interventions. These technological capabilities significantly improve decision-making while reducing uncertainty associated with long-term urban planning.

The circular economy represents another critical framework supporting sustainable urban transformation. Conventional linear economic models based upon resource extraction, consumption, and disposal have generated substantial environmental degradation and resource inefficiencies. Circular approaches instead prioritize resource conservation, waste minimization, material recovery, industrial symbiosis, product life-cycle optimization, and regenerative production systems. Environmental engineering contributes advanced recycling technologies, wastewater resource recovery, renewable energy generation, sustainable materials engineering, and waste-to-energy systems that transform urban waste streams into valuable economic resources. Natural sciences provide scientific understanding of material cycles, ecosystem interactions, and environmental impacts necessary for evaluating circular economy performance.

The interdisciplinary nature of adaptive urban development also requires substantial institutional collaboration. Engineers, environmental scientists, architects, ecologists, urban planners, economists, policymakers, public health experts, sociologists, information technology specialists, and community

stakeholders must cooperate throughout planning, implementation, monitoring, and evaluation processes. Effective governance structures facilitate knowledge integration across scientific disciplines while supporting transparent decision-making, stakeholder participation, policy coordination, and long-term sustainability planning. Such collaborative approaches increase institutional resilience while ensuring that technological innovation remains aligned with environmental conservation, social equity, and economic feasibility.

Engineering education and scientific research have correspondingly undergone significant transformation to address these emerging interdisciplinary challenges. Universities increasingly promote integrated curricula combining environmental engineering, ecological sciences, sustainability assessment, climate adaptation, systems thinking, computational modeling, and urban planning. Research institutions encourage collaborative investigations that bridge disciplinary boundaries while fostering technological innovation capable of addressing complex environmental problems. Advances in computational science, environmental genomics, biomimetic engineering, advanced materials, renewable energy technologies, and ecosystem modeling continue expanding opportunities for developing next-generation sustainable cities.

Despite remarkable scientific progress, numerous challenges remain. Financial limitations, institutional fragmentation, technological disparities, governance complexities, regulatory inconsistencies, population growth, environmental uncertainty, and unequal access to sustainable technologies continue limiting widespread implementation of integrated urban sustainability strategies. Climate change introduces additional uncertainty regarding future environmental conditions, requiring flexible planning methodologies capable of accommodating evolving scientific knowledge and emerging environmental risks. Consequently, adaptive management, continuous environmental monitoring, and evidence-based policymaking have become indispensable components of resilient urban governance.

The review examines the scientific perspectives emerging from environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism to evaluate their collective contribution toward creating adaptive, low-carbon, resilient, sustainable, and climate-responsive urban systems. Particular emphasis is placed on interdisciplinary integration, technological innovation, ecological engineering, nature-based solutions, digital environmental management, renewable energy systems, circular economy principles, climate adaptation strategies, ecosystem resilience, and sustainable infrastructure development. By synthesizing contemporary scientific evidence across multiple disciplines, this work seeks to demonstrate that the convergence of engineering excellence with ecological intelligence represents one of the most promising pathways for developing future cities that simultaneously protect environmental integrity, strengthen climate resilience, improve public health, enhance resource efficiency, and promote sustainable socioeconomic development for present and future generations.

The accelerating pressures of climate change, rapid urbanization, resource depletion, and environmental degradation necessitate the development of integrative and forward-looking paradigms for sustainable urban transformation. This study explores the scientific perspectives underpinning the synergy between environmental engineering and eco-urbanism, emphasizing their collective potential to enable adaptive, low-carbon, and resilient urban systems. Environmental engineering, traditionally focused on pollution control, resource management, and infrastructure optimization, is increasingly intersecting with eco-urbanism, a multidisciplinary framework that prioritizes ecological integrity, human well-being, and sustainable spatial planning. The convergence of these domains fosters a systems-oriented approach to urban development, wherein technological innovation, ecological design, and socio-economic considerations are harmonized. This paper critically examines contemporary theoretical frameworks, methodological approaches, and practical implementations that exemplify this synergy. It highlights the role of advanced environmental engineering solutions—such as green infrastructure, decentralized water and wastewater treatment systems, renewable energy integration, and circular resource management—in shaping eco-urbanistic strategies. Simultaneously, eco-urbanism contributes spatial, architectural, and policy-oriented dimensions that enhance the functionality and scalability of engineered systems within complex urban environments. The interplay between these fields supports the transition from linear, resource-intensive urban models toward regenerative and circular urban metabolisms. Particular attention is given to adaptive capacity and resilience, which are increasingly recognized as essential attributes of sustainable cities. The integration of smart technologies, data-driven decision-making, and climate-responsive design enables urban systems to anticipate, absorb, and recover from environmental

and socio-economic shocks. Moreover, low-carbon development pathways are explored through the lens of energy-efficient infrastructure, sustainable mobility systems, and nature-based solutions that collectively reduce greenhouse gas emissions while enhancing urban livability. The study also addresses key challenges and limitations associated with the implementation of synergistic approaches, including governance fragmentation, financial constraints, technological disparities, and the need for interdisciplinary collaboration. It underscores the importance of policy coherence, stakeholder engagement, and capacity building in facilitating the effective integration of environmental engineering principles within eco-urbanistic planning frameworks. Furthermore, emerging trends such as digital urbanism, climate-neutral cities, and biomimetic design are discussed as critical enablers of future urban sustainability. The scientific synergy between environmental engineering and eco-urbanism represents a transformative pathway toward sustainable urban futures. By integrating technical expertise with ecological and socio-spatial considerations, this approach provides a robust foundation for the development of adaptive, low-carbon, and resilient urban systems capable of addressing the complex challenges of the 21st century.

The 21st century is characterized by an unprecedented convergence of environmental, demographic, and technological transformations that are fundamentally reshaping the structure and function of urban systems worldwide. Rapid urbanization, intensifying climate change, escalating resource scarcity, and the growing complexity of socio-economic interactions have collectively exposed the limitations of conventional urban development models. Historically, cities have evolved through linear, resource-intensive paradigms that prioritize economic expansion often at the expense of ecological integrity and long-term sustainability. These trajectories have resulted in increased greenhouse gas emissions, environmental degradation, infrastructural inefficiencies, and heightened vulnerability to climate-induced hazards. Within this context, the necessity for integrative, adaptive, and resilience-oriented approaches to urban development has become a central concern within contemporary scientific discourse (Alberti, M. 2008).

Environmental engineering has long played a pivotal role in addressing urban environmental challenges through the design, optimization, and management of systems related to water supply, wastewater treatment, air quality control, solid waste management, and energy systems. Traditionally grounded in principles of applied science and technological innovation, the discipline has evolved from end-of-pipe solutions toward more holistic and preventive strategies that emphasize sustainability, efficiency, and resource recovery. Modern environmental engineering increasingly incorporates concepts such as circular economy, life-cycle assessment, and systems thinking, thereby expanding its scope beyond isolated technical interventions toward integrated urban environmental management (Alghamdi, S. A. 2020).

Concurrently, eco-urbanism has emerged as a multidisciplinary framework that integrates ecological principles with urban planning, architecture, and socio-economic development. Rooted in sustainability science, eco-urbanism seeks to create urban environments that are not only environmentally sound but also socially inclusive and economically viable. It emphasizes the harmonization of built and natural systems through strategies such as compact urban form, mixed land use, green infrastructure, biodiversity conservation, and climate-responsive design. Unlike traditional urban planning approaches that often operate in disciplinary silos, eco-urbanism adopts a transdisciplinary perspective, recognizing the interconnectedness of ecological processes, human behavior, and technological systems (Bai, X., Dawson, R. J., Ürge-Vorsatz, D., et al. 2018).

The growing recognition of the interdependencies between environmental engineering and eco-urbanism has catalyzed the emergence of synergistic frameworks that leverage the strengths of both domains. This synergy is particularly significant in the context of developing adaptive, low-carbon, and resilient urban systems capable of responding to the multifaceted challenges of contemporary urbanization (Beatley, T. 2011). Adaptive capacity, defined as the ability of urban systems to adjust to changing conditions and uncertainties, is increasingly essential in an era marked by climate variability and socio-economic disruptions. Similarly, resilience—the capacity to absorb, recover from, and transform in response to shocks and stresses—has become a critical attribute of sustainable cities. Low-carbon development, aimed at minimizing greenhouse gas emissions while maintaining economic growth and social well-being, further complements these objectives by addressing the root causes of climate change (Blanco, H., Alberti, M., Forsyth, A., et al. 2009).

The integration of environmental engineering and eco-urbanism facilitates the transition from conventional urban systems toward more sustainable and regenerative models. For instance, the implementation of green infrastructure—such as urban forests, green roofs, permeable surfaces, and constructed wetlands—demonstrates the convergence of engineered and ecological solutions (Bournakis, I., Karanikolas, P., & Komilis, D. 2019). These systems not only enhance storm water management and reduce urban heat island effects but also contribute to biodiversity, air quality improvement, and human well-being. Similarly, decentralized and nature-based wastewater treatment systems exemplify how engineering innovations can be aligned with ecological design principles to achieve resource efficiency and environmental protection (Brabec, E., Schnepel, K. T., & Breuste, J. 2017).

Energy systems represent another critical domain where the synergy between environmental engineering and eco-urbanism is particularly evident. The integration of renewable energy technologies, such as solar photovoltaic, wind energy, and district heating and cooling systems, within urban design frameworks supports the development of low-carbon cities. Smart grids, energy storage systems, and demand-side management further enhance the efficiency and resilience of urban energy infrastructure. Eco-urbanistic approaches complement these technologies by promoting energy-efficient building design, passive heating and cooling strategies, and sustainable urban morphology that reduces energy demand (Campbell, S. 1996).

Water resource management is equally central to the sustainability of urban systems. Integrated urban water management (IUWM) approaches, which combine supply, wastewater, and storm water management within a unified framework, exemplify the convergence of environmental engineering and eco-urbanism (Carrus, G., Scopelliti, M., & Laforteza, R. 2017). Techniques such as rainwater harvesting, greater reuse, and sustainable urban drainage systems (SUDS) contribute to water conservation, flood mitigation, and ecosystem restoration. These strategies are increasingly supported by digital technologies, including real-time monitoring, data analytics, and decision-support systems, which enable more adaptive and responsive management of urban water resources.

Despite the promising potential of synergistic approaches, several challenges hinder their widespread implementation. Institutional fragmentation, characterized by the separation of responsibilities across different sectors and governance levels, often impedes the coordination required for integrated urban planning and management (Colding, J. 2011). Financial constraints and the high initial costs associated with innovative technologies can limit their adoption, particularly in developing regions. Additionally, disparities in technical capacity, data availability, and stakeholder engagement further complicate the operationalization of integrated frameworks. Addressing these challenges requires not only technological innovation but also institutional reform, policy integration, and capacity building (Dalkmann, H., & Brannigan, C. 2007).

The role of policy and governance is therefore critical in facilitating the integration of environmental engineering and eco-urbanism. Regulatory frameworks, urban development policies, and financial incentives must be aligned to support sustainable infrastructure development and ecological design. Participatory approaches that engage diverse stakeholders—including governments, private sector actors, academia, and local communities—are essential for ensuring that urban development strategies are inclusive, context-specific, and socially acceptable. Furthermore, international initiatives such as the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly Goal 11 (Sustainable Cities and Communities) and Goal 13 (Climate Action), provide a global framework for guiding national and local efforts toward sustainable urbanization (Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L. J., et al. 2012).

Technological advancements are also playing a transformative role in shaping the future of urban systems. The proliferation of digital technologies, including the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and geographic information systems (GIS), has given rise to the concept of smart cities. When integrated with eco-urbanistic principles, these technologies enable more efficient resource management, enhanced service delivery, and improved quality of life. For example, smart sensors can monitor air and water quality in real time, while data analytics can optimize energy consumption and waste management processes. However, the integration of digital technologies must be carefully managed to address issues related to data privacy, cybersecurity, and social equity (Dewulf, A., & Mostert, E. 2010).

Emerging concepts such as circular urban metabolism and regenerative design further expand the scope of sustainable urban development. Circular urban metabolism emphasizes the closed-loop flow of resources, wherein waste is minimized and materials are continuously reused and recycled. Regenerative design goes beyond sustainability by aiming to restore and enhance natural systems, thereby creating positive environmental and social impacts. These approaches align closely with the principles of both environmental engineering and eco-urbanism, reinforcing the importance of their integration in achieving long-term urban sustainability (Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., et al. 2013).

In addition to environmental and technological considerations, social dimensions are integral to the success of sustainable urban systems. Equity, inclusivity, and community well-being must be central to urban development strategies. Eco-urbanism emphasizes the creation of livable and healthy environments through access to green spaces, sustainable mobility options, and community-oriented design. Environmental engineering contributes by ensuring the provision of safe and reliable infrastructure services, such as clean water, sanitation, and waste management. The integration of these domains thus supports not only environmental sustainability but also social resilience and quality of life (Evans, J. P. 2011).

The interdisciplinary nature of the synergy between environmental engineering and eco-urbanism necessitates new approaches to education, research, and professional practice. Academic institutions and research organizations must foster cross-disciplinary collaboration and develop curricula that integrate engineering, environmental science, urban planning, and social sciences (Folke, C. 2006). Professional practitioners must adopt systems thinking and collaborative approaches to address the complex challenges of urban development. Furthermore, the dissemination of knowledge and best practices through international networks and platforms is essential for accelerating the adoption of innovative solutions (Fuenfschilling, L., & Truffer, B. 2014).

The integration of environmental engineering and eco-urbanism represents a critical pathway toward the development of adaptive, low-carbon, and resilient urban systems. By bridging the gap between technological innovation and ecological design, this synergy enables more holistic and sustainable approaches to urban development. As cities continue to grow and evolve in the face of global challenges, the adoption of integrated frameworks that prioritize sustainability, resilience, and inclusivity will be essential for ensuring the well-being of current and future generations. The scientific exploration of these synergistic interactions thus provides valuable insights and guidance for policymakers, practitioners, and researchers committed to advancing sustainable urban futures.

Background

The accelerating expansion of urban populations represents one of the most significant demographic transformations in human history. Urban centers have evolved into complex socio-ecological systems that concentrate economic activities, technological innovation, industrial production, transportation networks, educational institutions, and healthcare services. Although cities occupy only a relatively small proportion of the Earth's terrestrial surface, they account for the majority of global energy consumption, greenhouse gas emissions, municipal solid waste generation, freshwater utilization, and environmental pollution. These realities have intensified scientific interest in developing urban systems capable of balancing socioeconomic development with environmental sustainability, ecological preservation, and long-term climate resilience. Consequently, the integration of environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism has emerged as a transformative interdisciplinary framework for addressing contemporary urban challenges while supporting sustainable development objectives.

Historically, urban development primarily emphasized economic productivity, industrial expansion, transportation efficiency, and infrastructure growth. Environmental considerations were frequently addressed only after adverse ecological consequences became evident, resulting in widespread air pollution, water contamination, habitat fragmentation, excessive resource consumption, and declining environmental quality. During the twentieth century, rapid industrialization and urban expansion substantially altered natural landscapes, disrupted hydrological systems, reduced biodiversity, and increased dependence on fossil fuel-based infrastructure. These developments highlighted the limitations of conventional engineering approaches that treated environmental protection as an independent sector rather than an integral component of urban planning and infrastructure design.

Environmental engineering gradually emerged as a specialized scientific discipline dedicated to protecting human health and environmental quality through technological innovation. Initially focused on water treatment, wastewater management, sanitation, and pollution control, environmental engineering has progressively expanded to encompass renewable energy systems, sustainable infrastructure, environmental biotechnology, ecological restoration, climate adaptation, carbon management, environmental monitoring, waste valorization, circular economy technologies, and integrated resource management. Contemporary environmental engineers increasingly recognize that technological solutions must operate in harmony with ecological processes to achieve durable sustainability outcomes.

Simultaneously, advances within engineering and natural sciences have profoundly expanded scientific understanding of Earth's environmental systems. Research in climatology, atmospheric sciences, ecology, hydrology, geology, environmental chemistry, microbiology, environmental physics, materials science, and systems biology has demonstrated that natural ecosystems function through highly interconnected processes characterized by dynamic feedback mechanisms. Human activities influence these complex systems through greenhouse gas emissions, land-use change, pollution, biodiversity loss, resource extraction, and alterations of natural biogeochemical cycles. This growing body of scientific evidence has reinforced the necessity of incorporating ecological knowledge into engineering practice and urban planning.

Eco-urbanism emerged during the late twentieth and early twenty-first centuries as a holistic response to these environmental challenges. Unlike conventional urban planning approaches that frequently separate built environments from natural ecosystems, eco-urbanism promotes the integration of ecological principles throughout urban design, infrastructure development, transportation planning, landscape architecture, and resource management. Eco-urbanism recognizes cities as living ecosystems in which natural and engineered components continuously interact. Consequently, sustainable urban development requires protecting ecosystem services while simultaneously improving economic productivity, public health, environmental quality, and social equity.

The scientific foundations of eco-urbanism are deeply rooted in systems thinking. Rather than examining individual infrastructure components independently, systems-based approaches evaluate the interactions among transportation networks, water resources, energy systems, green infrastructure, ecological habitats, public health, economic activities, and social institutions. Systems engineering methodologies enable researchers to identify complex feedback relationships, optimize resource utilization, minimize unintended environmental consequences, and improve overall urban resilience. This interdisciplinary perspective increasingly guides modern environmental engineering research and sustainable urban development strategies.

Climate change has become one of the principal drivers accelerating the convergence of environmental engineering and eco-urbanism. Rising global temperatures, changing precipitation patterns, increasing frequency of extreme weather events, prolonged droughts, coastal flooding, sea-level rise, wildfire risks, and ecosystem degradation have exposed the vulnerability of conventional urban infrastructure. Many existing transportation systems, drainage networks, electrical grids, water distribution systems, and public facilities were designed according to historical climatic conditions that no longer adequately represent contemporary environmental realities. Consequently, engineers and urban planners are increasingly adopting adaptive infrastructure approaches capable of maintaining functionality under uncertain and evolving climatic conditions.

Adaptive urban systems are designed to anticipate, absorb, recover from, and adapt to environmental disturbances while minimizing disruptions to essential services. This concept extends beyond traditional disaster management by incorporating resilience into every stage of infrastructure planning, design, operation, maintenance, and long-term management. Flexible engineering designs, modular infrastructure, distributed energy systems, decentralized water treatment technologies, and multifunctional green infrastructure collectively contribute to improved urban resilience while reducing environmental impacts. Adaptive capacity has therefore become a defining characteristic of sustainable urban systems.

Low-carbon development constitutes another central component of modern environmental engineering. Urban areas contribute a substantial proportion of global carbon dioxide emissions through transportation, electricity generation, industrial production, heating, cooling, and construction activities.

Decarbonizing urban environments requires comprehensive strategies integrating renewable energy technologies, energy-efficient buildings, sustainable transportation, electrification, green construction materials, carbon sequestration, circular resource utilization, and intelligent energy management systems. Environmental engineering provides many of the technological innovations necessary to achieve these objectives, while natural sciences supply the scientific understanding required to evaluate environmental performance and ecosystem responses.

Engineering and natural sciences have also significantly advanced knowledge concerning ecosystem services and their importance for urban sustainability. Ecosystem services include air purification, climate regulation, stormwater management, groundwater recharge, carbon sequestration, soil stabilization, pollination, biodiversity conservation, recreational opportunities, and improvements in human physical and psychological health. Historically, these ecological functions were often overlooked in urban planning despite their substantial economic and environmental value. Contemporary eco-urbanism increasingly incorporates ecosystem services into infrastructure planning through nature-based solutions that complement conventional engineering interventions.

Nature-based solutions represent one of the most rapidly expanding research areas connecting environmental engineering with ecological sciences. Green roofs, living walls, urban forests, ecological corridors, constructed wetlands, bioswales, rain gardens, permeable pavements, restored rivers, and blue-green infrastructure exemplify multifunctional interventions that simultaneously improve environmental quality, reduce infrastructure costs, increase biodiversity, mitigate flood risks, moderate urban temperatures, enhance carbon storage, and improve public health. These approaches illustrate that ecological restoration and engineering innovation can reinforce one another rather than compete for urban space and investment.

Technological innovation has further strengthened interdisciplinary collaboration across engineering and natural sciences. The emergence of smart city technologies has enabled continuous environmental monitoring through distributed sensor networks capable of measuring air quality, water quality, energy consumption, traffic flow, meteorological conditions, noise pollution, and ecosystem health in real time. Internet of Things technologies generate extensive environmental datasets that support adaptive decision-making. Artificial intelligence and machine learning algorithms analyze these complex datasets to identify environmental trends, optimize infrastructure operations, forecast climate risks, and improve resource allocation. Geographic information systems, remote sensing platforms, unmanned aerial vehicles, satellite observations, and digital twin technologies further enhance scientific understanding of urban environmental dynamics.

The circular economy has become another influential framework supporting sustainable urban transformation. Traditional linear economic models characterized by extraction, production, consumption, and disposal generate considerable waste and environmental degradation. Circular economy principles seek to maintain materials, products, and resources within productive use for as long as possible through recycling, remanufacturing, repair, recovery, industrial symbiosis, and sustainable product design. Environmental engineering contributes technologies that recover valuable resources from municipal wastewater, organic waste, industrial by-products, and construction debris, thereby reducing environmental burdens while creating new economic opportunities.

Biodiversity conservation has similarly become an essential component of sustainable urban development. Urban expansion frequently fragments habitats, disrupts ecological connectivity, and threatens numerous plant and animal species. Integrating biodiversity conservation into engineering practice requires preserving ecological corridors, restoring degraded ecosystems, protecting native vegetation, promoting urban forestry, and designing wildlife-friendly infrastructure. Natural sciences provide ecological knowledge necessary for understanding species interactions, habitat requirements, ecosystem resilience, and landscape connectivity, thereby supporting evidence-based environmental planning.

Public health considerations further reinforce the importance of integrating environmental engineering with eco-urbanism. Air pollution, contaminated water supplies, excessive noise, inadequate sanitation, heat stress, and insufficient access to green spaces contribute substantially to morbidity and mortality within urban populations. Sustainable infrastructure, improved environmental quality, enhanced ecosystem services, active transportation networks, and expanded urban vegetation collectively promote healthier living environments while reducing healthcare burdens. Environmental engineering therefore

contributes not only to environmental protection but also to disease prevention, health promotion, and improvements in quality of life.

International policy initiatives have increasingly recognized the importance of sustainable urban systems. Global agreements addressing climate change, biodiversity conservation, disaster risk reduction, and sustainable development emphasize integrated approaches that combine scientific evidence, technological innovation, environmental stewardship, and collaborative governance. Governments, research institutions, international organizations, municipalities, and private-sector stakeholders are investing in climate adaptation strategies, renewable energy deployment, resilient infrastructure, sustainable mobility, and ecosystem restoration programs that reflect the growing convergence of environmental engineering and eco-urbanism.

Interdisciplinary collaboration remains fundamental to achieving these ambitious objectives. Engineers, environmental scientists, ecologists, architects, urban planners, climatologists, hydrologists, economists, public health specialists, policymakers, sociologists, information technology experts, and community stakeholders contribute complementary expertise throughout planning, implementation, monitoring, and evaluation processes. Such collaboration facilitates knowledge integration, technological innovation, adaptive governance, and evidence-based policymaking while ensuring that sustainability initiatives remain technically feasible, environmentally sound, socially equitable, and economically viable.

Despite remarkable scientific and technological progress, significant challenges continue to impede widespread implementation of adaptive, climate-responsive urban systems. Financial constraints, governance fragmentation, institutional barriers, technological inequalities, regulatory inconsistencies, rapidly changing climatic conditions, population growth, and competing development priorities complicate sustainable urban transformation. Addressing these challenges requires continued investment in interdisciplinary research, engineering innovation, scientific education, international collaboration, and integrated policy frameworks capable of translating scientific discoveries into practical urban solutions.

The scientific convergence of environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism therefore represents a comprehensive conceptual foundation for future urban development. By integrating technological innovation with ecological intelligence, adaptive management, climate resilience, and sustainable resource utilization, this interdisciplinary framework provides scientifically robust pathways for developing cities that are environmentally responsible, economically productive, socially inclusive, and resilient to future environmental change. As global urbanization continues to accelerate throughout the twenty-first century, the continued advancement of this integrated scientific paradigm will remain indispensable for achieving sustainable, low-carbon, adaptive, and climate-responsive urban systems capable of supporting both present and future generations.

Goal

The primary goal of this study is to systematically investigate and critically elucidate the synergistic interactions between environmental engineering and eco-urbanism, with the overarching aim of advancing the theoretical and applied foundations for the development of adaptive, low-carbon, and resilient urban systems. The research seeks to establish a comprehensive scientific understanding of how the integration of engineering-driven technological solutions and ecologically grounded urban design principles can collectively contribute to sustainable urban transformation in the context of accelerating global environmental and socio-economic challenges.

Specifically, the study aims to analyze and synthesize contemporary frameworks, strategies, and practices that demonstrate the convergence of environmental engineering and eco-urbanism across key domains, including water resource management, energy systems, waste management, and green infrastructure. It endeavors to identify the mechanisms through which such integration enhances urban adaptability, optimizes resource efficiency, reduces carbon emissions, and strengthens systemic resilience against climate-related and anthropogenic stressors.

The research seeks to develop a conceptual and analytical model that captures the dynamic interdependencies between engineered systems and ecological urban processes, thereby providing a structured basis for interdisciplinary planning and decision-making. By evaluating existing case studies

and theoretical models, the study aims to derive evidence-based insights and best practices that can inform policy development, urban governance, and sustainable infrastructure design.

The goal of this work is to contribute to the advancement of a holistic, systems-oriented paradigm in urban development, wherein environmental engineering and eco-urbanism are not treated as isolated disciplines but as complementary and mutually reinforcing components of a unified approach to achieving long-term urban sustainability, resilience, and low-carbon growth.

Methodology

This study adopts a rigorous, multidisciplinary methodological framework designed to systematically examine the synergistic interactions between environmental engineering and eco-urbanism within the context of adaptive, low-carbon, and resilient urban systems. The research is grounded in a qualitative-dominant mixed-methods approach, integrating systematic literature review, comparative analytical assessment, and conceptual synthesis to ensure both depth and methodological robustness.

The primary methodological component is a structured systematic literature review conducted in accordance with established academic standards, including principles aligned with Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). A comprehensive search strategy was implemented across major scientific databases, including Scopus, Web of Science, PubMed, and Google Scholar, to identify peer-reviewed journal articles, conference proceedings, policy reports, and high-impact academic publications. Search terms were carefully constructed using Boolean operators and keyword combinations such as “environmental engineering,” “eco-urbanism,” “sustainable urban systems,” “urban resilience,” “low-carbon cities,” “green infrastructure,” and “adaptive urban development.” Inclusion criteria encompassed publications in English from the period 2000 to 2025, with a focus on studies presenting empirical findings, theoretical frameworks, or applied case analyses relevant to the integration of engineering and ecological urban paradigms. Exclusion criteria involved non-peer-reviewed sources, studies lacking methodological transparency, and publications not directly addressing urban sustainability or integrative approaches.

Following the identification phase, a multi-stage screening process was employed, including title and abstract review, full-text assessment, and quality appraisal. Methodological quality and relevance were evaluated using standardized assessment tools, focusing on criteria such as research design validity, data reliability, analytical rigor, and contribution to the field. Data extraction was systematically conducted using a predefined matrix, capturing key variables such as study objectives, methodological approaches, technological interventions, ecological strategies, and reported outcomes related to sustainability, resilience, and carbon mitigation.

In addition to the literature review, a comparative analytical framework was applied to synthesize findings across diverse geographical and socio-economic contexts. This involved the categorization of case studies and models based on thematic domains, including water resource management, energy systems, waste management, green infrastructure, and urban planning strategies. Cross-case comparison enabled the identification of recurring patterns, best practices, and context-specific variations in the implementation of synergistic approaches. The analysis emphasized the evaluation of performance indicators such as environmental impact reduction, energy efficiency, resource optimization, and adaptive capacity enhancement.

The conceptual modeling approach was employed to develop an integrative framework that illustrates the dynamic interactions between environmental engineering systems and eco-urbanistic principles. Systems thinking and network analysis were utilized to map interdependencies among infrastructural, ecological, and socio-economic components of urban systems. This facilitated the identification of leverage points for intervention and the formulation of strategic pathways toward sustainable urban transformation.

To enhance the validity and reliability of the findings, triangulation was applied through the convergence of multiple data sources and analytical techniques. The integration of theoretical insights, empirical evidence, and applied case studies ensured a comprehensive understanding of the research problem. Limitations related to potential publication bias, regional disparities in data availability, and the heterogeneity of study designs were critically acknowledged and addressed through careful interpretation and contextualization of results.

The methodological approach provides a robust and systematic foundation for analyzing the complex and multidimensional relationships between environmental engineering and eco-urbanism, contributing to the advancement of knowledge and practice in sustainable urban development.

Results and Discussion

The synthesis of contemporary scientific literature demonstrates that the integration of environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism has fundamentally transformed the conceptualization of sustainable urban development. Rather than approaching urban environmental problems as isolated technical challenges, current research increasingly supports systems-based methodologies that recognize cities as dynamic socio-ecological systems characterized by continuous interactions among infrastructure, natural ecosystems, technological innovation, human populations, economic activities, and climatic processes. The reviewed evidence consistently indicates that successful urban sustainability depends upon multidisciplinary collaboration capable of integrating engineering expertise with ecological knowledge, environmental sciences, computational technologies, and adaptive governance. This interdisciplinary convergence has generated innovative approaches that simultaneously improve environmental quality, reduce greenhouse gas emissions, strengthen climate resilience, optimize resource utilization, and enhance human well-being.

One of the most significant findings emerging from recent scientific investigations is the evolving role of environmental engineering from a discipline traditionally focused on pollution control toward a comprehensive systems engineering science dedicated to sustainable environmental management. Historically, environmental engineers primarily addressed wastewater treatment, drinking water purification, solid waste disposal, industrial emissions control, and sanitation infrastructure. Contemporary engineering practice, however, extends well beyond these conventional responsibilities to encompass renewable energy integration, environmental restoration, ecological infrastructure, circular resource management, climate adaptation, ecosystem rehabilitation, intelligent environmental monitoring, and carbon-neutral infrastructure development. This transformation reflects increasing recognition that environmental sustainability cannot be achieved through isolated technological interventions but instead requires coordinated management of interconnected environmental systems operating across multiple spatial and temporal scales.

The reviewed studies consistently demonstrate that integrated environmental engineering substantially improves urban environmental performance compared with conventional infrastructure planning. Cities implementing multidisciplinary environmental engineering strategies report measurable reductions in greenhouse gas emissions, improvements in ambient air quality, enhanced water conservation, greater resource recovery, increased renewable energy utilization, and more efficient waste management. These outcomes result from coordinated implementation of advanced treatment technologies, decentralized infrastructure, sustainable building practices, ecological restoration initiatives, and intelligent environmental monitoring systems. Importantly, the benefits extend beyond environmental protection to include economic efficiency, public health improvements, increased infrastructure reliability, and enhanced resilience to environmental disturbances.

Engineering and natural sciences provide the scientific foundation supporting these technological advances. Climate science contributes increasingly sophisticated understanding of atmospheric processes, extreme weather dynamics, urban heat island formation, precipitation variability, and long-term climatic trends that influence infrastructure planning. Hydrological sciences improve understanding of watershed processes, groundwater recharge, stormwater dynamics, and integrated water resource management necessary for sustainable urban water systems. Ecological sciences elucidate ecosystem resilience, biodiversity conservation, ecological connectivity, and ecosystem service provision, enabling engineers to design infrastructure that complements rather than disrupts natural environmental processes. Materials science contributes innovative construction materials with improved durability, lower embodied carbon, enhanced energy efficiency, and greater environmental compatibility. Environmental chemistry supports pollution monitoring, contaminant removal technologies, and environmental risk assessment, while computational sciences facilitate advanced modeling, predictive simulations, and digital environmental management.

The interaction between engineering innovation and ecological science represents one of the most influential developments identified throughout the reviewed literature. Conventional infrastructure

frequently replaced natural ecosystems with impermeable surfaces, engineered drainage systems, and highly centralized utilities that altered hydrological cycles, fragmented habitats, increased flood risks, and intensified urban heat islands. Contemporary eco-urban engineering instead increasingly seeks to restore ecological functionality within urban environments by incorporating natural processes directly into infrastructure design. This paradigm shift reflects growing appreciation that ecosystems provide highly valuable engineering services including flood mitigation, climate regulation, carbon sequestration, water purification, erosion control, biodiversity support, and thermal regulation.

Nature-based solutions have therefore emerged as central components of adaptive urban engineering. Scientific evidence demonstrates that green roofs significantly reduce building energy demand by improving thermal insulation while simultaneously moderating urban temperatures and managing stormwater runoff. Urban forests provide substantial environmental benefits through carbon sequestration, air pollutant removal, microclimate regulation, biodiversity enhancement, and improvements in psychological well-being. Constructed wetlands simultaneously perform wastewater treatment, habitat restoration, nutrient removal, flood mitigation, and recreational functions. Bioswales, rain gardens, permeable pavements, and restored riparian corridors improve stormwater infiltration, reduce surface runoff, increase groundwater recharge, and decrease flood vulnerability. Collectively, these interventions illustrate that environmental engineering increasingly incorporates ecological intelligence to enhance infrastructure performance while reducing environmental impacts.

Another important finding concerns the role of resilience as a guiding principle for modern urban engineering. Earlier engineering philosophies frequently prioritized maximum efficiency under predictable operating conditions. Contemporary environmental uncertainties associated with climate change, however, require infrastructure capable of maintaining functionality despite increasingly variable environmental conditions. Consequently, resilience has become an essential design objective encompassing flexibility, redundancy, adaptability, recoverability, and robustness across urban systems. Adaptive engineering approaches identified throughout the literature incorporate modular infrastructure designs, decentralized resource management systems, distributed renewable energy generation, flexible transportation networks, intelligent water management technologies, and multifunctional public spaces capable of accommodating diverse environmental conditions. These adaptive characteristics reduce vulnerability to flooding, droughts, heat waves, infrastructure failures, and other environmental disturbances while simultaneously improving long-term operational reliability. Scientific evaluations consistently indicate that resilient infrastructure produces lower lifetime maintenance costs despite occasionally requiring greater initial investments, demonstrating the long-term economic advantages of resilience-oriented engineering strategies.

Water resource management constitutes another domain in which environmental engineering and natural sciences demonstrate particularly strong interdisciplinary integration. Urban water systems increasingly face simultaneous pressures arising from population growth, climate variability, pollution, aging infrastructure, and competing demands among domestic, industrial, agricultural, and ecological users. Conventional centralized water management approaches frequently prove insufficient under these increasingly complex circumstances. Integrated urban water management therefore emphasizes decentralized treatment technologies, rainwater harvesting, wastewater recycling, aquifer recharge, smart distribution networks, ecological restoration, and comprehensive watershed management.

Scientific investigations demonstrate that decentralized wastewater treatment systems improve water reuse opportunities while reducing energy requirements associated with extensive distribution networks. Advanced membrane technologies, biological treatment systems, nutrient recovery processes, and environmental biotechnology enable wastewater to become a valuable resource supporting agricultural irrigation, industrial processes, groundwater replenishment, and ecosystem restoration rather than merely representing waste requiring disposal. Such approaches exemplify circular economy principles increasingly incorporated into environmental engineering practice.

Similarly, sustainable stormwater management has shifted from rapid drainage toward integrated hydrological restoration. Conventional drainage systems designed primarily to remove runoff rapidly often increase downstream flooding while reducing groundwater recharge and degrading aquatic ecosystems. Contemporary engineering increasingly emphasizes low-impact development strategies that retain, infiltrate, store, and gradually release stormwater through green infrastructure. Scientific monitoring consistently demonstrates improved water quality, reduced peak discharge volumes,

increased groundwater replenishment, enhanced biodiversity, and reduced infrastructure maintenance costs associated with these ecological approaches.

The reviewed evidence also emphasizes the growing importance of renewable energy integration within sustainable urban systems. Urban energy consumption remains among the largest contributors to global greenhouse gas emissions. Environmental engineering therefore increasingly focuses upon integrating photovoltaic systems, wind energy, geothermal technologies, biomass utilization, district heating and cooling systems, energy storage technologies, hydrogen production, and intelligent energy management platforms into comprehensive urban energy strategies. Advances in engineering and materials sciences continue improving renewable energy efficiency while reducing production costs, thereby accelerating widespread implementation.

Energy-efficient buildings constitute another critical area of interdisciplinary progress. Building operations account for substantial proportions of urban energy demand and associated carbon emissions. Modern engineering approaches combine passive architectural design, advanced insulation materials, high-performance glazing, intelligent ventilation systems, renewable energy integration, automated environmental controls, and life-cycle optimization to minimize operational energy requirements. Natural sciences contribute understanding regarding heat transfer, solar radiation, material properties, indoor environmental quality, and human thermal comfort that supports evidence-based building design. Urban transportation similarly illustrates successful integration of engineering innovation with environmental sustainability objectives. Conventional automobile-dependent transportation systems contribute significantly to greenhouse gas emissions, air pollution, traffic congestion, noise pollution, and land consumption. Contemporary eco-urban engineering increasingly prioritizes multimodal transportation networks emphasizing public transit, active mobility, electric vehicles, intelligent traffic management, pedestrian infrastructure, cycling systems, and transit-oriented development. Scientific evaluations consistently demonstrate reductions in energy consumption, emissions, infrastructure costs, and public health burdens associated with sustainable transportation strategies.

Air quality management remains another major area where environmental engineering has achieved substantial advances. Rapid urbanization and industrialization have intensified exposure to particulate matter, nitrogen oxides, sulfur dioxide, ozone, volatile organic compounds, and other atmospheric pollutants associated with cardiovascular disease, respiratory disorders, neurological impairment, and premature mortality. Modern environmental engineering integrates emissions control technologies, atmospheric monitoring networks, computational dispersion modeling, green infrastructure, renewable energy deployment, and transportation optimization to improve urban air quality. Natural sciences provide increasingly detailed understanding regarding atmospheric chemistry, pollutant transport mechanisms, meteorological interactions, and exposure assessment necessary for effective environmental management.

An equally significant result emerging from the literature concerns the increasing reliance upon digital technologies to support environmental engineering decision-making. Smart environmental monitoring systems equipped with extensive sensor networks continuously collect real-time information regarding air quality, water quality, energy utilization, infrastructure performance, climatic conditions, and ecological indicators. These data streams enable engineers to identify emerging environmental problems rapidly while optimizing infrastructure operations based upon continuously updated environmental conditions. Predictive analytics increasingly support proactive rather than reactive environmental management, reducing operational costs while improving system reliability and environmental performance.

The scientific evidence demonstrates that environmental engineering has evolved into an integrative discipline operating at the intersection of engineering innovation, natural sciences, ecological restoration, and sustainable urban planning. Rather than merely mitigating environmental degradation after it occurs, contemporary engineering increasingly seeks to anticipate environmental challenges, strengthen ecosystem resilience, optimize resource utilization, and design infrastructure that actively contributes to ecological sustainability. The convergence of environmental engineering with eco-urbanism therefore represents not simply an incremental improvement in urban planning but a fundamental transformation in how cities are conceptualized, designed, operated, and continuously adapted to changing environmental conditions.

The findings synthesized in this first section consistently indicate that adaptive, low-carbon, and climate-responsive urban systems emerge most successfully when engineering decisions are informed by ecological principles, scientific evidence, technological innovation, and long-term sustainability objectives. This interdisciplinary integration establishes the scientific foundation upon which future urban resilience, environmental protection, and sustainable socioeconomic development will increasingly depend.

The synthesis of the reviewed literature further demonstrates that the successful implementation of eco-urbanism depends upon the continuous integration of engineering innovation with the fundamental principles of natural sciences. Contemporary research consistently supports the hypothesis that cities should no longer be interpreted solely as built environments dominated by engineered infrastructure, but rather as complex adaptive systems in which biological, hydrological, atmospheric, geological, technological, and socioeconomic processes continuously interact. This paradigm shift has substantially altered scientific perspectives regarding urban sustainability by recognizing that the resilience of cities is inseparable from the resilience of the ecosystems that support them. Consequently, environmental engineering increasingly functions as an interdisciplinary bridge connecting technological development with ecological stewardship and sustainable resource management.

One of the principal findings emerging from recent investigations concerns the growing importance of ecosystem-based engineering within modern urban planning. Traditional infrastructure development frequently relied upon extensive land modification, river channelization, impermeable construction materials, and centralized engineering systems that simplified natural landscapes while reducing ecological functionality. Although these approaches often improved short-term infrastructure efficiency, long-term evaluations have demonstrated considerable environmental costs, including biodiversity decline, increased flood frequency, groundwater depletion, elevated urban temperatures, habitat fragmentation, and diminished ecosystem services. These observations have encouraged researchers to develop engineering methodologies that preserve or restore ecological functions while simultaneously satisfying urban infrastructure requirements.

The integration of ecological engineering into urban development has generated substantial environmental and socioeconomic benefits. Ecological engineering emphasizes designing infrastructure that operates in accordance with natural processes rather than replacing them entirely. Restored wetlands, vegetated floodplains, urban forests, riparian buffer zones, ecological corridors, and multifunctional green spaces increasingly perform engineering functions traditionally assigned to highly mechanized infrastructure. Scientific evaluations indicate that these systems frequently demonstrate superior long-term sustainability because they possess intrinsic adaptive capacity, require comparatively lower maintenance, and provide numerous ecosystem services beyond their primary engineering objectives.

Urban biodiversity has consequently emerged as an increasingly important indicator of sustainable city performance. Earlier planning paradigms often regarded biodiversity conservation as largely incompatible with intensive urbanization. However, contemporary ecological research demonstrates that appropriately designed urban environments can support diverse biological communities while simultaneously improving ecosystem stability and human well-being. Environmental engineering contributes to biodiversity conservation through habitat restoration, ecological connectivity, environmentally sensitive stormwater management, sustainable landscape design, and pollution reduction technologies. Natural sciences provide essential knowledge regarding species interactions, habitat requirements, ecological succession, and landscape ecology that guides engineering decisions intended to strengthen urban ecosystem resilience.

The reviewed literature consistently emphasizes that biodiversity contributes directly to infrastructure resilience. Diverse ecological communities improve pollination, nutrient cycling, soil formation, carbon sequestration, biological pest control, and climate regulation while increasing ecosystem resistance to environmental disturbances. Consequently, cities characterized by greater ecological diversity often demonstrate improved resilience to climate change, invasive species, disease outbreaks, and environmental degradation. These findings reinforce the importance of incorporating biodiversity objectives into engineering design rather than treating conservation as an independent environmental activity.

Climate adaptation remains one of the strongest drivers promoting interdisciplinary integration across engineering and natural sciences. Climate projections consistently indicate increasing variability in temperature, precipitation, sea-level rise, drought frequency, flooding intensity, and extreme weather events throughout the twenty-first century. These changing environmental conditions require engineering systems capable of accommodating uncertainty while maintaining operational reliability. Traditional deterministic engineering methodologies based upon historical climate observations are increasingly insufficient because future environmental conditions may differ substantially from historical experience.

Adaptive engineering therefore increasingly employs probabilistic design methodologies supported by advanced climate modeling, scenario analysis, environmental simulation, and uncertainty assessment. Engineers now routinely evaluate multiple climatic scenarios when designing transportation infrastructure, water supply systems, wastewater treatment facilities, energy networks, coastal protection measures, and public buildings. Natural sciences contribute sophisticated climate projections, atmospheric circulation models, hydrological simulations, ecological forecasting, and environmental risk assessments that enable engineering systems to remain functional despite uncertain future environmental conditions.

The scientific evidence further indicates that adaptive capacity should not be interpreted exclusively as technological flexibility. Institutional resilience, governance effectiveness, public participation, scientific literacy, and policy coordination equally influence the capacity of cities to respond successfully to environmental change. Consequently, sustainable urban engineering increasingly incorporates social sciences, economics, public administration, and behavioral sciences alongside engineering and natural sciences. This multidisciplinary perspective recognizes that infrastructure operates within broader institutional systems whose effectiveness depends upon governance quality, financial stability, regulatory consistency, and stakeholder cooperation.

Urban heat island mitigation provides a particularly illustrative example of interdisciplinary collaboration. Rising urban temperatures result from complex interactions among land-use change, reduced vegetation cover, anthropogenic heat emissions, atmospheric pollution, building geometry, construction materials, and regional climate conditions. Environmental engineering addresses these challenges through reflective construction materials, green roofs, vegetated walls, urban forestry, passive cooling technologies, district cooling systems, and energy-efficient buildings. Natural sciences contribute understanding regarding atmospheric physics, radiation balance, evapotranspiration, vegetation dynamics, and microclimate formation. Eco-urbanism integrates these scientific findings into spatial planning strategies that maximize natural ventilation, preserve green spaces, reduce heat accumulation, and improve thermal comfort for urban populations.

Scientific monitoring consistently demonstrates that integrated heat mitigation strategies reduce ambient temperatures, decrease electricity consumption associated with air conditioning, improve air quality, reduce heat-related mortality, and enhance overall urban livability. These findings further illustrate that environmental engineering interventions frequently generate multiple co-benefits extending beyond their primary objectives, thereby strengthening arguments for integrated sustainability planning.

The reviewed studies also reveal substantial advances in sustainable materials engineering. Construction activities consume enormous quantities of natural resources while generating significant greenhouse gas emissions and environmental degradation. Engineering research increasingly focuses upon low-carbon concrete, recycled construction materials, geopolymer binders, bio-based composites, recycled steel, engineered timber, phase-change materials, and nanotechnology-enhanced building products capable of reducing environmental impacts throughout infrastructure life cycles. Materials scientists contribute innovative manufacturing techniques while environmental scientists evaluate life-cycle environmental performance, resource efficiency, toxicity, durability, and recyclability.

Life-cycle assessment has become an indispensable analytical tool within sustainable environmental engineering. Rather than evaluating infrastructure exclusively during operational phases, life-cycle methodologies examine environmental impacts associated with raw material extraction, manufacturing, transportation, construction, operation, maintenance, rehabilitation, and eventual decommissioning or recycling. Scientific evidence consistently indicates that life-cycle optimization substantially reduces cumulative environmental burdens while improving long-term economic efficiency. Consequently, infrastructure sustainability increasingly depends upon comprehensive environmental assessments

extending across entire infrastructure life spans rather than focusing solely upon immediate construction costs.

The circular economy has similarly become deeply integrated into contemporary engineering practice. Research demonstrates that significant opportunities exist to recover valuable resources from municipal waste streams, industrial by-products, agricultural residues, and wastewater treatment processes. Environmental engineering technologies increasingly recover phosphorus, nitrogen, biogas, reclaimed water, rare metals, construction aggregates, plastics, and organic materials that can be reintroduced into productive economic systems. These resource recovery approaches reduce dependence upon virgin material extraction while minimizing landfill utilization, environmental pollution, and greenhouse gas emissions.

Scientific investigations further indicate that circular resource management improves urban resilience by reducing dependence upon external supply chains that may become disrupted during natural disasters, geopolitical instability, or economic crises. Decentralized resource recovery systems strengthen local self-sufficiency while promoting sustainable economic development through creation of secondary material markets and environmentally responsible industrial activities.

Another important area identified throughout the reviewed literature concerns the rapid expansion of digital environmental technologies. The emergence of smart cities has fundamentally altered environmental monitoring capabilities by enabling continuous observation of infrastructure performance and environmental conditions. Internet of Things sensors distributed throughout urban environments measure atmospheric pollutants, traffic density, energy consumption, water quality, structural integrity, meteorological variables, acoustic environments, and ecological indicators with unprecedented spatial and temporal resolution.

Artificial intelligence has become increasingly influential in interpreting these extensive environmental datasets. Machine learning algorithms identify complex environmental relationships that remain difficult to detect using conventional statistical approaches. Predictive models forecast flooding, infrastructure deterioration, air pollution episodes, water demand fluctuations, energy consumption patterns, and ecosystem responses, allowing engineers to implement preventative interventions before critical failures occur. Such predictive capabilities significantly improve infrastructure reliability while reducing maintenance expenditures and environmental risks.

Digital twins represent one of the most promising technological innovations supporting adaptive urban engineering. These virtual representations integrate engineering designs with continuously updated environmental observations, operational data, and predictive simulations. Engineers utilize digital twins to evaluate infrastructure performance under alternative climate scenarios, optimize maintenance schedules, assess disaster preparedness, simulate urban expansion, and examine long-term sustainability outcomes before implementing physical modifications. Scientific evaluations indicate that digital twins substantially improve planning accuracy while reducing uncertainties associated with infrastructure investment decisions.

Remote sensing technologies have similarly transformed environmental assessment. High-resolution satellite imagery, airborne LiDAR, hyperspectral observations, thermal imaging, and unmanned aerial vehicles enable continuous monitoring of vegetation health, land-use change, urban expansion, surface temperatures, flood dynamics, coastal erosion, air pollution dispersion, and ecosystem condition across extensive geographic regions. These observations provide valuable information supporting environmental engineering, ecological restoration, disaster management, and sustainable urban planning.

Geographic information systems integrate these diverse spatial datasets into comprehensive decision-support platforms capable of evaluating environmental vulnerabilities, infrastructure distribution, demographic characteristics, ecological connectivity, transportation accessibility, and land-use dynamics simultaneously. Such integrated spatial analyses facilitate evidence-based planning while improving coordination among engineers, urban planners, environmental scientists, emergency managers, and policymakers.

An equally important finding emerging from the literature concerns the growing emphasis upon environmental justice within sustainable urban engineering. Scientific investigations increasingly demonstrate that environmental burdens, including air pollution, inadequate green space, flood exposure, contaminated land, poor infrastructure, and climate vulnerability, are frequently distributed

unevenly across urban populations. Consequently, adaptive engineering strategies increasingly incorporate equity considerations to ensure that environmental improvements benefit all communities rather than exclusively economically advantaged neighborhoods.

Environmental engineering therefore increasingly contributes not only to technological advancement but also to social sustainability. Access to clean drinking water, efficient sanitation, healthy housing, sustainable transportation, safe public spaces, renewable energy, and resilient infrastructure significantly influences public health, educational opportunities, economic productivity, and quality of life. Integrating engineering excellence with environmental justice strengthens both social resilience and long-term sustainability.

The scientific study demonstrates that engineering and natural sciences have become inseparable components of contemporary eco-urbanism. Advances in ecological engineering, climate adaptation, sustainable materials, digital technologies, circular economy strategies, biodiversity conservation, environmental monitoring, and systems science collectively illustrate that sustainable cities require integrated scientific approaches rather than isolated disciplinary solutions. The convergence of these scientific domains establishes a robust foundation for adaptive urban systems capable of responding effectively to accelerating environmental change while promoting ecological integrity, technological innovation, economic resilience, and human well-being. The findings further indicate that future progress will increasingly depend upon interdisciplinary collaboration, continuous technological innovation, evidence-based policymaking, and sustained investment in scientific research that bridges environmental engineering with the broader engineering and natural sciences.

The comprehensive evaluation of the reviewed scientific literature demonstrates that adaptive infrastructure has become one of the defining characteristics of twenty-first-century environmental engineering and eco-urbanism. Unlike conventional infrastructure systems designed primarily for operational efficiency under relatively stable environmental conditions, adaptive infrastructure is intentionally developed to accommodate climatic uncertainty, environmental variability, technological evolution, demographic changes, and shifting socioeconomic demands throughout its operational lifespan. This transformation represents a significant departure from traditional engineering paradigms, emphasizing flexibility, redundancy, modularity, recoverability, and continuous optimization rather than static performance objectives. The evidence synthesized throughout this review consistently indicates that adaptive engineering substantially enhances the resilience of urban systems while reducing long-term environmental, economic, and societal vulnerabilities.

Climate resilience occupies a central position within this evolving engineering philosophy. The increasing frequency of extreme weather events, prolonged droughts, severe precipitation episodes, coastal flooding, heat waves, wildfires, and infrastructure failures has highlighted the limitations of conventional engineering methodologies that rely heavily upon historical environmental observations. Numerous investigations conclude that future urban infrastructure must be capable of functioning under environmental conditions that may differ substantially from those previously experienced. Consequently, engineers increasingly incorporate climate projections, probabilistic modeling, environmental uncertainty analysis, and adaptive management principles into infrastructure planning, design, construction, and operational strategies.

One of the most significant scientific findings concerns the integration of resilience assessment into infrastructure evaluation. Earlier engineering practice frequently measured infrastructure performance according to operational efficiency, construction costs, and immediate functionality. Contemporary resilience assessments instead evaluate the capacity of infrastructure systems to resist disturbance, maintain essential services during environmental crises, recover rapidly following disruptions, and continuously adapt to changing environmental conditions. This broader analytical perspective provides a more comprehensive understanding of long-term infrastructure sustainability and has become increasingly influential in environmental engineering research.

Transportation infrastructure illustrates this transition particularly well. Conventional transportation systems designed exclusively to maximize vehicle throughput frequently exhibit considerable vulnerability to flooding, extreme temperatures, landslides, and other climate-related hazards. Scientific investigations demonstrate that climate-resilient transportation networks require integrated planning that incorporates elevated roadways where appropriate, permeable surfaces, intelligent drainage systems, ecological corridors, sustainable public transportation, multimodal mobility, distributed transportation

routes, and real-time traffic management supported by digital technologies. These interventions collectively improve operational continuity while simultaneously reducing environmental impacts and greenhouse gas emissions.

The reviewed studies further indicate that resilient transportation systems contribute significantly to urban sustainability by encouraging modal shifts toward public transit, walking, cycling, and electrified mobility. Environmental engineering increasingly collaborates with urban planners, transportation engineers, environmental scientists, and public health specialists to develop transportation systems that simultaneously improve mobility, reduce emissions, minimize land consumption, enhance air quality, and strengthen public health. Such interdisciplinary collaboration reflects the growing recognition that transportation infrastructure influences numerous environmental and societal outcomes extending well beyond mobility alone.

Water infrastructure similarly demonstrates the importance of adaptive engineering approaches. Climate-induced variability in precipitation patterns has increased both flooding and water scarcity within many urban regions, creating complex management challenges that conventional centralized infrastructure often struggles to address effectively. The scientific evidence strongly supports integrated urban water management strategies that combine engineered infrastructure with natural hydrological processes. Decentralized water treatment, rainwater harvesting, aquifer recharge, stormwater reuse, green infrastructure, and watershed restoration collectively improve water security while increasing resilience to climatic variability.

An important finding emerging from recent investigations concerns the role of blue-green infrastructure in strengthening urban hydrological resilience. Blue infrastructure encompasses rivers, lakes, wetlands, canals, reservoirs, and other aquatic systems, whereas green infrastructure includes urban forests, parks, vegetated corridors, green roofs, bioswales, and permeable landscapes. Rather than functioning independently, these ecological components increasingly operate as integrated engineering systems that regulate water flow, reduce flood peaks, improve water quality, moderate urban temperatures, support biodiversity, and enhance recreational opportunities.

Scientific evaluations consistently demonstrate that blue-green infrastructure frequently performs multiple engineering functions simultaneously. Constructed wetlands provide wastewater treatment while restoring wildlife habitats. Urban forests improve stormwater interception while reducing heat stress and atmospheric pollution. Green roofs decrease runoff volumes while enhancing thermal insulation and extending roof longevity. Restored river corridors reduce flood risks while improving ecological connectivity and recreational value. These multifunctional characteristics distinguish nature-based infrastructure from many conventional engineering interventions that often address only a single operational objective.

Another major finding concerns the increasing importance of ecosystem resilience within sustainable urban engineering. Natural ecosystems possess remarkable adaptive capacities resulting from biological diversity, ecological redundancy, evolutionary processes, and self-organizing mechanisms. Engineering and natural sciences increasingly seek to understand these ecological characteristics and incorporate them into infrastructure design through biomimetic engineering, ecological restoration, and nature-inspired technologies. This scientific approach recognizes that natural ecosystems have evolved highly efficient mechanisms for managing environmental variability over extensive temporal scales.

Biomimetic engineering has consequently emerged as an innovative research field connecting engineering with biological sciences. Engineers increasingly study plant structures, animal physiology, microbial communities, and ecosystem organization to develop more sustainable construction materials, water treatment technologies, ventilation systems, structural designs, and energy-efficient infrastructure. These biologically inspired innovations frequently demonstrate improved resource efficiency, reduced environmental impacts, enhanced durability, and greater adaptability compared with conventional technological approaches.

The reviewed literature also highlights significant advances in urban energy resilience. Modern cities require continuous access to reliable energy supplies supporting transportation, healthcare, communication, manufacturing, residential services, and critical infrastructure. Conventional centralized electricity generation systems may become vulnerable to natural disasters, cyberattacks, equipment failures, fuel shortages, and climatic disturbances. Consequently, environmental engineering increasingly emphasizes distributed renewable energy generation, microgrids, intelligent electrical

networks, energy storage technologies, hydrogen systems, and demand-side management strategies that improve operational flexibility and reduce dependence upon centralized infrastructure.

Renewable energy integration has become particularly significant within low-carbon urban development. Solar photovoltaic systems, wind energy installations, geothermal technologies, biomass conversion, hydroelectric resources, and waste-to-energy facilities collectively contribute to substantial reductions in greenhouse gas emissions while enhancing long-term energy security. Scientific investigations consistently demonstrate that combining multiple renewable energy sources with advanced storage technologies improves grid stability while reducing carbon intensity. Engineering innovations in battery technologies, thermal energy storage, hydrogen production, and power electronics continue expanding opportunities for renewable energy integration within urban environments.

Building engineering represents another domain in which adaptive and low-carbon principles have significantly transformed professional practice. Buildings account for a considerable proportion of global energy consumption, carbon emissions, and material utilization throughout their operational lifecycles. Contemporary environmental engineering therefore emphasizes integrated building performance rather than isolated architectural or mechanical components. Passive solar design, natural ventilation, advanced insulation materials, intelligent environmental controls, renewable energy integration, recycled construction materials, water-efficient technologies, and healthy indoor environments collectively contribute to high-performance buildings capable of adapting to changing climatic conditions while minimizing environmental impacts.

Scientific evidence further indicates that intelligent building management systems substantially improve operational efficiency through continuous monitoring and automated optimization. Sensors measuring temperature, humidity, carbon dioxide concentrations, occupancy patterns, lighting conditions, and energy consumption enable artificial intelligence algorithms to optimize heating, cooling, ventilation, lighting, and water utilization in real time. Such technologies reduce operational costs while simultaneously improving occupant comfort and environmental performance.

The discussion further reveals that sustainable urban metabolism has become an increasingly influential conceptual framework within environmental engineering. Urban metabolism describes the flows of energy, water, materials, nutrients, waste, and information throughout urban systems. Traditional linear urban metabolism relies heavily upon external resource inputs and generates substantial waste outputs. Contemporary engineering instead seeks to establish circular urban metabolism characterized by efficient resource utilization, material recovery, renewable energy generation, and waste minimization. Scientific analyses consistently indicate that circular urban metabolism substantially improves resource security while reducing environmental degradation and greenhouse gas emissions.

Solid waste management exemplifies this transformation. Earlier waste management strategies primarily emphasized collection and disposal, frequently through landfilling or incineration. Contemporary environmental engineering increasingly views municipal waste as a valuable resource capable of supporting energy production, material recovery, nutrient recycling, and industrial symbiosis. Advanced sorting technologies, anaerobic digestion, composting, gasification, pyrolysis, biochemical conversion, and automated recycling systems substantially increase resource recovery while minimizing environmental pollution. These technologies simultaneously contribute to climate mitigation by reducing methane emissions from landfills and decreasing demand for virgin material extraction.

Environmental monitoring has similarly undergone remarkable scientific advancement. Continuous environmental observation is now considered essential for adaptive infrastructure management because environmental conditions frequently change more rapidly than conventional monitoring systems can detect. Networks of atmospheric sensors, hydrological monitoring stations, remote sensing platforms, satellite observations, autonomous vehicles, environmental drones, and biological monitoring systems provide unprecedented quantities of environmental information supporting real-time decision-making. Engineering and natural sciences increasingly collaborate to interpret these complex datasets through artificial intelligence, machine learning, statistical modeling, and computational simulation.

Digital twins continue to demonstrate considerable potential for improving adaptive infrastructure management. By integrating engineering designs with continuously updated operational data and environmental observations, digital twins enable simulation of future climate scenarios, infrastructure failures, maintenance requirements, urban growth patterns, and environmental interventions before implementation. Scientific investigations consistently report improved planning accuracy, enhanced

operational efficiency, reduced maintenance expenditures, and greater infrastructure resilience associated with digital twin technologies. Their capacity to support scenario-based planning is particularly valuable under conditions of climatic uncertainty.

The reviewed literature also demonstrates increasing convergence between environmental engineering and disaster risk reduction. Resilient urban systems increasingly incorporate comprehensive hazard assessments, early warning technologies, emergency response planning, evacuation modeling, and post-disaster recovery strategies into routine infrastructure planning. Rather than treating disasters as exceptional events, adaptive engineering recognizes that climatic disturbances will become increasingly common throughout future decades. Consequently, infrastructure resilience depends upon continuous preparedness rather than episodic emergency responses.

Community participation has emerged as another important determinant of adaptive urban resilience. Scientific investigations consistently indicate that infrastructure performs more effectively when local communities actively participate in planning, implementation, monitoring, and maintenance processes. Community knowledge frequently provides valuable information regarding local environmental conditions, historical climate variability, ecosystem characteristics, and social vulnerabilities that complement scientific observations. Participatory planning therefore strengthens both engineering effectiveness and institutional resilience by fostering public trust, improving governance, and increasing societal acceptance of sustainability initiatives.

An equally significant finding concerns the necessity of interdisciplinary education and professional collaboration. Environmental engineering increasingly requires expertise extending beyond conventional engineering disciplines to include ecology, climatology, environmental chemistry, computational science, economics, public policy, sociology, architecture, landscape planning, and public health. Universities and research institutions have responded by developing interdisciplinary educational programs emphasizing systems thinking, sustainability science, climate adaptation, digital technologies, and integrated environmental management. These educational transformations are expected to strengthen future engineering capacity while promoting continued scientific innovation.

The scientific evidence synthesized in this section demonstrates that adaptive infrastructure, climate resilience, ecosystem-based engineering, renewable energy integration, intelligent environmental management, and circular resource utilization collectively represent fundamental components of sustainable urban systems. The convergence of environmental engineering with engineering and natural sciences has generated comprehensive methodologies capable of addressing increasingly complex environmental challenges through scientifically informed, technologically advanced, and ecologically responsible solutions. These findings strongly support continued interdisciplinary research and integrated planning as essential prerequisites for developing resilient, adaptive, low-carbon, and climate-responsive cities throughout the coming decades.

The comprehensive analysis of the reviewed scientific evidence further demonstrates that the transition toward low-carbon urban systems represents one of the most influential developments within contemporary environmental engineering and eco-urbanism. Decarbonization is no longer interpreted exclusively as an energy-sector objective but rather as an integrated systems approach encompassing transportation, construction, water management, industrial production, waste utilization, ecological restoration, digital technologies, urban planning, and environmental governance. The reviewed literature consistently indicates that meaningful reductions in greenhouse gas emissions require coordinated implementation of engineering innovations supported by ecological principles, advanced computational methods, and interdisciplinary scientific collaboration.

A principal finding emerging from recent investigations concerns the increasing interdependence between carbon mitigation and urban resilience. Earlier sustainability frameworks frequently considered climate mitigation and climate adaptation as relatively independent policy domains. However, contemporary scientific evidence demonstrates that many engineering interventions simultaneously contribute to both objectives. Renewable energy systems reduce greenhouse gas emissions while improving energy security. Urban forests sequester atmospheric carbon while mitigating urban heat islands, improving air quality, enhancing biodiversity, and reducing stormwater runoff. Sustainable transportation reduces fossil fuel consumption while improving public health and decreasing environmental pollution. Consequently, integrated engineering strategies frequently generate synergistic

environmental, economic, and social benefits substantially exceeding those achieved through isolated interventions.

The reviewed investigations consistently identify renewable energy deployment as one of the most effective mechanisms for reducing urban carbon emissions. Environmental engineering has experienced remarkable technological progress in photovoltaic systems, offshore and onshore wind technologies, geothermal energy utilization, biomass conversion, hydrogen production, energy storage systems, and intelligent electrical networks. Continuous improvements in conversion efficiencies, manufacturing processes, material durability, and system integration have substantially increased the technical and economic feasibility of renewable energy implementation within urban environments.

Scientific analyses indicate that distributed renewable energy systems provide multiple advantages beyond carbon reduction alone. Decentralized electricity generation decreases transmission losses, improves infrastructure resilience, reduces dependence upon centralized fossil fuel facilities, strengthens energy security, and enables greater community participation in sustainable energy production. Environmental engineers increasingly integrate renewable technologies directly into urban infrastructure through building-integrated photovoltaics, solar façades, rooftop installations, district energy systems, renewable-powered transportation, and hybrid microgrid architectures. Such integrated approaches transform buildings and neighborhoods from passive energy consumers into active contributors to sustainable energy production.

The discussion further demonstrates that intelligent energy management has become equally important as renewable energy generation itself. Artificial intelligence, machine learning algorithms, predictive analytics, and advanced optimization models continuously regulate electricity generation, storage, distribution, and consumption according to real-time environmental conditions and user demand. Smart grids dynamically balance renewable energy production with storage capacity, electricity pricing, weather forecasts, and consumer behavior, thereby improving overall system efficiency while minimizing greenhouse gas emissions. These technological developments illustrate how digital engineering increasingly complements traditional environmental infrastructure.

Another significant finding concerns the transformation of urban construction practices through sustainable materials engineering and life-cycle optimization. Conventional construction activities contribute substantially to global carbon emissions because of intensive energy consumption, cement production, steel manufacturing, resource extraction, and transportation requirements. Engineering research has therefore increasingly focused upon alternative construction materials characterized by lower embodied carbon, improved durability, greater recyclability, and enhanced environmental compatibility.

Geopolymer concretes, recycled aggregates, engineered timber products, bio-based composites, low-carbon cement formulations, recycled steel, and advanced insulation materials increasingly demonstrate promising environmental performance while maintaining structural integrity and engineering reliability. Materials science continues expanding opportunities to reduce carbon emissions associated with infrastructure development through innovations in nanotechnology, additive manufacturing, biomaterials, self-healing concrete, carbon-sequestering construction products, and environmentally compatible polymers. These technological advances illustrate the important contribution of engineering and natural sciences to sustainable infrastructure development.

Life-cycle assessment remains indispensable for evaluating the environmental performance of construction materials and infrastructure systems. Scientific evidence consistently indicates that operational emissions alone provide an incomplete representation of infrastructure sustainability. Comprehensive assessments encompassing resource extraction, manufacturing, transportation, construction, operation, maintenance, rehabilitation, recycling, and decommissioning enable engineers to identify opportunities for environmental optimization throughout entire infrastructure life cycles. Consequently, sustainable engineering increasingly prioritizes cumulative environmental performance rather than minimizing only immediate construction costs.

Urban planning also exhibits substantial transformation under low-carbon engineering principles. Compact urban form, mixed land use, transit-oriented development, pedestrian accessibility, cycling infrastructure, distributed public services, and green public spaces collectively reduce transportation demand, improve energy efficiency, preserve natural ecosystems, and strengthen community resilience. Scientific investigations consistently demonstrate that urban morphology significantly influences long-

term environmental performance by affecting transportation patterns, building energy demand, infrastructure requirements, land consumption, and ecological connectivity.

Eco-urbanism integrates these engineering findings with ecological planning principles to create multifunctional urban landscapes. Green infrastructure networks simultaneously support biodiversity conservation, climate regulation, recreational opportunities, carbon sequestration, water management, and environmental education. Urban ecological corridors connect fragmented habitats while improving species migration and ecosystem resilience. Integrated landscape planning therefore enables environmental engineering interventions to function as components of broader ecological systems rather than isolated technological installations.

The reviewed studies further reveal substantial advances in environmental monitoring technologies supporting sustainable urban management. Traditional environmental assessments often relied upon periodic field observations providing limited temporal resolution. Contemporary engineering increasingly utilizes continuous environmental monitoring systems capable of generating extensive datasets describing atmospheric conditions, hydrological processes, biodiversity indicators, infrastructure performance, energy consumption, and environmental quality in real time.

Internet of Things technologies have become particularly influential in this regard. Distributed sensor networks continuously monitor air pollution concentrations, water quality parameters, soil moisture, traffic density, structural health, meteorological conditions, energy utilization, acoustic environments, and ecosystem dynamics. Environmental engineers integrate these observations with cloud computing platforms, artificial intelligence algorithms, and predictive analytics to optimize infrastructure operations and identify emerging environmental risks before they develop into critical failures.

Machine learning applications continue expanding rapidly throughout environmental engineering. Predictive algorithms analyze historical observations together with continuously updated environmental data to forecast flooding events, drought conditions, infrastructure deterioration, air pollution episodes, energy demand, transportation congestion, and ecological changes. Scientific investigations consistently report improved planning accuracy, enhanced operational efficiency, and reduced maintenance costs associated with artificial intelligence-supported infrastructure management. These findings illustrate the growing importance of computational sciences within sustainable environmental engineering.

Digital twin technology represents another transformative innovation identified throughout the reviewed literature. Digital twins integrate engineering designs, environmental observations, sensor networks, simulation models, and operational databases into continuously updated virtual representations of urban systems. Engineers utilize these virtual environments to evaluate infrastructure resilience, optimize maintenance strategies, simulate disaster scenarios, assess climate adaptation interventions, and compare alternative development strategies before physical implementation. Such predictive capabilities significantly reduce uncertainty while improving evidence-based decision-making.

The discussion also emphasizes the importance of integrated environmental governance. Technological innovation alone cannot achieve sustainable urban transformation without supportive institutional frameworks, effective public policies, transparent regulatory systems, adequate financial investment, and interdisciplinary collaboration. Scientific investigations consistently demonstrate that successful low-carbon transitions require coordinated participation among governments, municipalities, research institutions, engineers, environmental scientists, architects, urban planners, economists, public health specialists, private industries, and local communities.

Adaptive governance has consequently emerged as an important research area connecting environmental engineering with public administration and policy sciences. Adaptive governance emphasizes continuous learning, scientific monitoring, flexible decision-making, stakeholder engagement, policy evaluation, and institutional responsiveness to emerging environmental conditions. Such governance structures improve the capacity of cities to respond effectively to climatic uncertainty, technological innovation, demographic change, and evolving sustainability priorities.

Economic analyses further reinforce the value of integrated environmental engineering approaches. Although adaptive infrastructure and sustainable technologies occasionally require greater initial investment than conventional alternatives, life-cycle evaluations consistently demonstrate favorable long-term economic performance resulting from lower operational costs, reduced maintenance expenditures, improved resource efficiency, decreased environmental remediation requirements, enhanced disaster resilience, and improved public health outcomes. These findings challenge traditional

assumptions that environmental sustainability necessarily increases infrastructure costs. Instead, scientific evidence increasingly supports sustainability as a driver of long-term economic resilience and technological competitiveness.

The reviewed literature similarly identifies public health improvements as major co-benefits of low-carbon urban engineering. Cleaner air resulting from renewable energy deployment and sustainable transportation decreases respiratory and cardiovascular diseases. Expanded green infrastructure improves mental health, encourages physical activity, reduces urban temperatures, and strengthens social cohesion. Improved water management reduces exposure to environmental contaminants while strengthening public sanitation. Consequently, environmental engineering contributes substantially to preventive healthcare by addressing environmental determinants of human health.

Environmental justice remains another important consideration within contemporary sustainable urban development. Numerous investigations demonstrate that disadvantaged communities frequently experience disproportionate exposure to environmental pollution, inadequate infrastructure, flood risks, urban heat, and limited access to green spaces. Environmental engineering increasingly incorporates equity-oriented planning methodologies that prioritize fair distribution of environmental benefits, infrastructure investments, and climate adaptation resources. Such approaches strengthen social resilience while promoting inclusive urban sustainability.

International collaboration has likewise become increasingly significant in advancing sustainable engineering innovation. Climate change, biodiversity loss, pollution, and resource depletion represent global environmental challenges requiring coordinated scientific responses extending beyond national boundaries. Collaborative research initiatives facilitate knowledge exchange, technology transfer, standardized sustainability assessment methodologies, and harmonized environmental policies that accelerate implementation of adaptive engineering solutions across diverse geographical and socioeconomic contexts.

An important finding emerging from comparative international studies concerns the necessity of context-specific adaptation. Although fundamental engineering principles remain broadly applicable, successful sustainability strategies must accommodate regional climatic conditions, geological characteristics, biodiversity patterns, cultural traditions, governance structures, economic capacities, technological infrastructure, and demographic trends. Environmental engineering therefore increasingly combines universal scientific principles with locally adapted implementation strategies that reflect the environmental and social characteristics of individual cities.

Education and professional development continue to play central roles in supporting these scientific advances. Universities increasingly integrate environmental engineering, climate science, ecological restoration, computational modeling, sustainability assessment, circular economy principles, geographic information systems, artificial intelligence, and systems thinking into interdisciplinary educational programs. These curricular transformations prepare future engineers and environmental scientists to address increasingly complex sustainability challenges requiring expertise across multiple scientific domains.

Collectively, the evidence synthesized throughout this section demonstrates that low-carbon engineering extends far beyond greenhouse gas reduction alone. It encompasses comprehensive transformation of urban metabolism, infrastructure systems, resource utilization, environmental governance, technological innovation, ecological restoration, and societal organization. Engineering and natural sciences jointly provide the scientific foundation enabling cities to reduce environmental impacts while simultaneously strengthening resilience, improving public health, enhancing biodiversity conservation, increasing economic productivity, and supporting sustainable development.

The reviewed findings consistently support the conclusion that future urban sustainability will depend upon continued convergence among environmental engineering, eco-urbanism, digital technologies, climate science, ecological engineering, renewable energy systems, intelligent infrastructure management, and interdisciplinary governance. Such integration establishes a scientifically robust pathway toward adaptive, resilient, climate-responsive, and environmentally sustainable urban systems capable of meeting the complex challenges associated with accelerating global urbanization and ongoing environmental change.

The comprehensive synthesis of the reviewed scientific literature demonstrates that the future evolution of environmental engineering and eco-urbanism will be increasingly shaped by the integration of

advanced digital technologies, artificial intelligence, systems engineering, environmental informatics, and predictive computational sciences. Contemporary cities generate unprecedented volumes of environmental, infrastructural, demographic, and socioeconomic data, creating new opportunities for evidence-based decision-making while simultaneously presenting significant challenges regarding data integration, interoperability, cybersecurity, governance, and ethical management. The reviewed investigations consistently indicate that digital transformation is fundamentally altering how urban systems are monitored, analyzed, designed, operated, and continuously optimized, thereby establishing a new scientific paradigm for adaptive and resilient urban development.

One of the most influential findings concerns the emergence of environmental informatics as a multidisciplinary scientific field integrating engineering, computer science, environmental sciences, mathematics, and data analytics. Environmental informatics enables researchers to collect, process, visualize, and interpret extensive environmental datasets originating from sensor networks, satellite observations, unmanned aerial systems, remote sensing platforms, meteorological stations, hydrological monitoring systems, biological observations, and infrastructure management databases. The capacity to integrate these heterogeneous data sources significantly improves scientific understanding of urban environmental dynamics while enhancing engineering decision-making across multiple spatial and temporal scales.

Artificial intelligence has become one of the most transformative technologies supporting this digital transition. Machine learning algorithms increasingly identify complex nonlinear relationships among climatic variables, infrastructure performance, environmental quality indicators, resource consumption patterns, ecological processes, and human behavior. Unlike conventional statistical approaches that frequently require predefined assumptions regarding system relationships, artificial intelligence continuously improves predictive accuracy through iterative learning based upon newly acquired environmental observations. Consequently, engineers are increasingly capable of forecasting environmental disturbances, optimizing infrastructure performance, and implementing adaptive interventions before system failures occur.

Scientific investigations consistently demonstrate the value of predictive analytics for climate adaptation. Flood forecasting systems supported by artificial intelligence integrate meteorological observations, hydrological models, topographical information, land-use characteristics, drainage network capacities, and historical flood records to predict inundation patterns with increasing precision. Similar methodologies support drought forecasting, wildfire risk assessment, urban heat island prediction, air quality management, biodiversity monitoring, infrastructure deterioration analysis, and renewable energy optimization. These predictive capabilities substantially improve urban preparedness while reducing economic losses and environmental damage associated with extreme climatic events.

Digital twins continue to receive considerable scientific attention because of their ability to integrate engineering design with real-time environmental observations and predictive computational modeling. Unlike static engineering models, digital twins continuously evolve as new environmental information becomes available, thereby providing dynamic representations of urban infrastructure throughout operational lifecycles. Scientific evaluations indicate that digital twins support optimized infrastructure maintenance, efficient resource allocation, disaster preparedness, carbon reduction planning, energy optimization, and long-term sustainability assessment.

The reviewed literature emphasizes that digital twins also facilitate interdisciplinary collaboration among engineers, environmental scientists, architects, urban planners, policymakers, emergency managers, economists, and public health specialists. By providing shared virtual environments containing continuously updated engineering and environmental information, digital twins improve communication among diverse professional disciplines while supporting transparent, evidence-based urban governance. These collaborative capabilities become increasingly important as urban sustainability challenges grow more complex and interconnected.

The expansion of Internet of Things technologies has similarly revolutionized environmental engineering practice. Modern sensor networks continuously monitor atmospheric pollutants, greenhouse gas emissions, water quality parameters, wastewater treatment performance, structural integrity, soil moisture, biodiversity indicators, energy consumption, transportation activity, meteorological conditions, and ecosystem health. These extensive monitoring systems enable adaptive infrastructure

management based upon current environmental conditions rather than predetermined operational schedules.

Scientific analyses indicate that continuous environmental monitoring substantially improves infrastructure efficiency while reducing operational expenditures. Water distribution systems equipped with intelligent sensors rapidly detect leakage, contamination events, pressure fluctuations, and consumption anomalies, thereby minimizing water losses and improving public health protection. Intelligent wastewater treatment facilities continuously optimize biological treatment processes according to influent characteristics, improving pollutant removal while reducing energy consumption. Smart energy systems regulate electricity production and distribution in response to changing weather conditions and consumer demand, maximizing renewable energy utilization while maintaining grid stability.

The discussion further reveals that environmental engineering increasingly incorporates autonomous technologies to support sustainable urban management. Unmanned aerial vehicles monitor vegetation health, construction activities, flood progression, coastal erosion, atmospheric pollution, and disaster impacts with exceptional spatial resolution. Autonomous underwater vehicles assess water quality, sediment transport, aquatic ecosystems, and infrastructure conditions within rivers, reservoirs, and coastal environments. Robotic inspection systems evaluate bridges, tunnels, pipelines, wastewater facilities, and renewable energy installations while minimizing occupational risks and improving maintenance efficiency.

An equally important finding concerns the increasing application of systems engineering principles within urban sustainability research. Systems engineering emphasizes understanding interactions among infrastructure components rather than optimizing individual technologies independently. Contemporary cities function through extensive networks linking transportation, energy, water, communications, healthcare, waste management, ecological systems, housing, industry, education, and governance. Disruptions within one subsystem frequently propagate rapidly throughout interconnected urban networks, emphasizing the necessity of integrated engineering analysis.

Scientific investigations consistently demonstrate that systems-based planning improves resilience by identifying interdependencies among critical infrastructure systems before failures occur. Network analysis, systems dynamics modeling, agent-based simulations, and integrated assessment frameworks enable engineers to evaluate cascading effects associated with infrastructure disruptions while identifying interventions capable of improving overall system robustness. Such analytical methodologies have become indispensable for addressing increasingly complex sustainability challenges influenced by climate change, urbanization, technological development, and demographic growth.

Environmental risk assessment has similarly undergone substantial methodological advancement. Traditional engineering risk assessments often focused upon individual hazards evaluated independently. Contemporary environmental engineering increasingly recognizes that urban systems experience multiple interacting risks including climate change, biodiversity decline, pollution, infrastructure aging, cyber threats, resource scarcity, economic instability, and public health emergencies. Integrated risk assessment therefore evaluates compound hazards, cumulative environmental impacts, systemic vulnerabilities, and adaptive capacities simultaneously.

Scientific evidence further demonstrates that resilience indicators have become essential tools supporting sustainable urban evaluation. Contemporary assessment frameworks increasingly incorporate environmental, economic, infrastructural, ecological, institutional, and social indicators measuring adaptive capacity, ecosystem health, carbon intensity, biodiversity conservation, renewable energy utilization, resource efficiency, infrastructure reliability, public health, and governance effectiveness. These multidimensional indicators provide comprehensive evaluations of urban sustainability while facilitating comparisons among cities and supporting continuous improvement.

The reviewed investigations consistently emphasize the growing significance of ecosystem services accounting within urban planning. Ecosystem services represent measurable contributions of natural ecosystems to human well-being through climate regulation, carbon sequestration, water purification, flood mitigation, soil formation, nutrient cycling, biodiversity conservation, recreational opportunities, and cultural values. Historically, these ecological benefits were rarely incorporated into engineering or economic decision-making despite their considerable societal importance.

Environmental economists and ecological engineers increasingly collaborate to quantify ecosystem services using advanced valuation methodologies that support infrastructure planning and policy development. Scientific analyses demonstrate that preserving or restoring natural ecosystems frequently provides greater long-term economic value than replacing ecological functions with highly mechanized engineering infrastructure. Consequently, environmental engineering increasingly incorporates natural capital assessment into sustainable infrastructure evaluation.

Urban forestry exemplifies this interdisciplinary integration. Scientific monitoring consistently demonstrates that strategically planned urban forests reduce atmospheric carbon dioxide concentrations, remove particulate matter, decrease ambient temperatures, attenuate stormwater runoff, improve biodiversity, reduce noise pollution, and enhance psychological well-being. These diverse ecosystem services substantially increase the overall value of green infrastructure while reinforcing its importance within adaptive urban systems.

The reviewed literature also identifies considerable progress in environmental biotechnology supporting sustainable cities. Biological treatment processes increasingly replace energy-intensive physicochemical technologies within wastewater treatment, contaminated land remediation, industrial pollution control, organic waste management, and resource recovery. Advances in microbiology, molecular biology, environmental genomics, and synthetic biology continue improving understanding of microbial communities responsible for nutrient cycling, pollutant degradation, methane production, carbon sequestration, and ecological restoration.

Biotechnological innovations enable more efficient removal of emerging contaminants including pharmaceuticals, endocrine-disrupting compounds, microplastics, and persistent organic pollutants that conventional treatment technologies often fail to eliminate completely. Such advances significantly improve environmental protection while supporting circular resource management through recovery of nutrients, reclaimed water, bioenergy, and valuable biochemical products.

An important discussion emerging from the reviewed evidence concerns the necessity of integrating engineering innovation with environmental ethics and responsible governance. Technological advancement alone cannot guarantee sustainable urban development unless accompanied by transparent decision-making, stakeholder participation, environmental accountability, scientific integrity, and equitable resource distribution. Environmental engineering increasingly recognizes ethical responsibilities associated with infrastructure development, climate adaptation, biodiversity conservation, and intergenerational sustainability.

Scientific investigations consistently demonstrate that public participation strengthens sustainability outcomes by incorporating local knowledge, increasing community acceptance, improving policy legitimacy, and facilitating collaborative environmental stewardship. Citizen science initiatives supported by digital technologies enable residents to contribute environmental observations regarding air quality, biodiversity, water pollution, noise levels, and urban heat, thereby expanding scientific monitoring capacities while promoting environmental awareness.

International cooperation continues to emerge as another critical determinant of future urban sustainability. Climate change, atmospheric pollution, biodiversity loss, marine degradation, water scarcity, and resource depletion transcend political boundaries, requiring coordinated global scientific responses. Collaborative international research accelerates technological innovation, standardizes sustainability methodologies, promotes knowledge exchange, supports technology transfer, and strengthens institutional capacity within rapidly urbanizing regions.

The discussion also identifies education and workforce development as indispensable prerequisites for sustaining scientific progress. Future environmental engineers must possess interdisciplinary competencies extending beyond conventional engineering education to include climate science, ecology, environmental policy, computational modeling, geographic information systems, artificial intelligence, economics, sustainability assessment, environmental law, and communication sciences. Universities increasingly respond by establishing multidisciplinary educational programs emphasizing systems thinking, resilience engineering, digital technologies, and integrated environmental management.

Despite remarkable scientific achievements, the reviewed literature acknowledges several continuing challenges. Rapid technological advancement frequently exceeds regulatory adaptation, creating governance gaps regarding artificial intelligence, environmental data management, cybersecurity,

autonomous infrastructure, and digital privacy. Financial constraints continue limiting implementation of advanced sustainability technologies within many municipalities, particularly in developing economies. Institutional fragmentation frequently impedes interdisciplinary collaboration among engineering, planning, environmental protection, and public health agencies. Furthermore, uncertainties associated with future climatic conditions require continuous refinement of engineering methodologies capable of adapting to evolving environmental realities.

Nevertheless, the collective scientific evidence overwhelmingly supports the conclusion that the convergence of environmental engineering, engineering and natural sciences, eco-urbanism, artificial intelligence, digital infrastructure, environmental informatics, ecological restoration, and adaptive governance represents one of the most promising pathways toward sustainable urban transformation. Future cities will increasingly depend upon intelligent infrastructure systems capable of learning from environmental observations, anticipating climatic disturbances, optimizing resource utilization, preserving ecosystem integrity, reducing greenhouse gas emissions, strengthening public health, and supporting equitable socioeconomic development.

The sustainable urban systems cannot be achieved through isolated technological innovations or independent disciplinary efforts. Instead, long-term resilience requires continuous integration of engineering excellence, scientific discovery, ecological understanding, digital transformation, institutional collaboration, and evidence-based governance. This interdisciplinary scientific framework establishes the foundation for adaptive, low-carbon, resilient, and climate-responsive cities capable of addressing the unprecedented environmental challenges of the twenty-first century while supporting sustainable development for future generations.

The comprehensive analysis conducted in this study reveals a robust and multidimensional convergence between environmental engineering and eco-urbanism, demonstrating that their synergistic integration constitutes a foundational pillar for advancing adaptive, low-carbon, and resilient urban systems. The synthesis of evidence derived from the systematic literature review and comparative analytical framework underscores that contemporary urban sustainability cannot be effectively achieved through isolated disciplinary interventions. Rather, it necessitates a holistic systems-based paradigm in which technological, ecological, spatial, and socio-economic dimensions are intricately interlinked and co-evolve within complex urban environments (Giffinger, R., & Gudrun, H. 2010).

A central finding of this investigation is the progressive shift from conventional, linear models of urban development toward circular and regenerative systems, facilitated by the integration of environmental engineering principles with eco-urbanistic design strategies. Traditional engineering approaches, historically focused on end-of-pipe solutions and centralized infrastructure systems, are increasingly being complemented by decentralized, nature-based, and resource-efficient alternatives. This transition reflects a broader epistemological evolution within the field, wherein sustainability is no longer perceived as an ancillary objective but as a core operational principle embedded within the design, implementation, and management of urban systems (Girardet, H. 2015).

In the domain of water resource management, the results highlight a significant advancement in the adoption of integrated urban water management frameworks that combine engineering innovation with ecological design. Techniques such as rainwater harvesting, grey water recycling, and sustainable urban drainage systems have demonstrated substantial efficacy in reducing potable water demand, mitigating urban flooding, and enhancing groundwater recharge. The incorporation of constructed wetlands and biofiltration systems exemplifies the convergence of engineered and natural processes, enabling the treatment of wastewater while simultaneously providing ecological benefits such as habitat creation and biodiversity enhancement. Comparative analysis across case studies indicates that cities implementing such integrative approaches exhibit improved resilience to hydrological variability and climate-induced extreme events, including droughts and intense precipitation (Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., et al. 2008).

Energy systems represent another critical axis of synergy, wherein environmental engineering innovations are operationalized within eco-urbanistic frameworks to facilitate low-carbon transitions. The deployment of renewable energy technologies, including solar photovoltaic systems, wind turbines, and district energy networks, is significantly enhanced when integrated with urban design strategies that optimize energy demand. Passive design principles, compact urban morphology, and mixed land-use patterns contribute to reduced energy consumption, thereby amplifying the effectiveness of

technological interventions. The integration of smart grid technologies and energy storage systems further enhances system flexibility and resilience, enabling real-time balancing of supply and demand. Empirical findings suggest that cities adopting such integrated energy strategies achieve substantial reductions in greenhouse gas emissions while maintaining or improving energy security and economic performance (Hansen, R., & Pauleit, S. 2014).

The management of solid waste and material flows constitutes an additional domain in which the synergy between environmental engineering and eco-urbanism yields significant sustainability benefits. The transition toward circular urban metabolism is facilitated by engineering solutions such as advanced recycling technologies, waste-to-energy systems, and material recovery facilities, which are embedded within broader eco-urbanistic strategies emphasizing resource efficiency and waste minimization. The spatial integration of waste management infrastructure within urban planning frameworks enhances accessibility, reduces transportation-related emissions, and promotes community participation in recycling and waste reduction initiatives. The results indicate that cities adopting circular economy principles exhibit improved resource productivity, reduced environmental impact, and enhanced economic resilience (Hofmann, C., & Schellnhuber, H. J. 2009).

Green infrastructure emerges as a critical interface between environmental engineering and eco-urbanism, embodying the integration of ecological processes within engineered urban systems. The implementation of urban green spaces, green roofs, permeable pavements, and urban forests contributes to multiple co-benefits, including stormwater management, urban heat island mitigation, air quality improvement, and enhancement of human well-being (Zuo, J., & Zhao, Z.-Y. 2014). The analysis reveals that green infrastructure systems, when designed and managed in conjunction with traditional engineering infrastructure, significantly enhance urban resilience by providing adaptive capacity to absorb and respond to environmental stressors. Moreover, the multifunctionality of green infrastructure aligns with the principles of eco-urbanism, promoting the coexistence of ecological and urban functions within limited spatial contexts (Holling, C. S. 2003).

A critical dimension of the findings pertains to the role of digital technologies and data-driven approaches in facilitating the integration of environmental engineering and eco-urbanism. The emergence of smart city paradigms, characterized by the deployment of sensors, data analytics, and real-time monitoring systems, enables more efficient and adaptive management of urban infrastructure. Environmental engineering systems, such as water distribution networks and energy grids, benefit from enhanced operational efficiency and predictive maintenance capabilities, while eco-urbanistic planning is informed by data-driven insights into spatial patterns, resource flows, and environmental conditions. However, the results also highlight potential challenges associated with digital integration, including issues related to data governance, cybersecurity, and the digital divide, which may exacerbate socio-economic inequalities if not adequately addressed (IEA (International Energy Agency. 2021).

The analysis further underscores the importance of governance structures and institutional frameworks in shaping the effectiveness of synergistic approaches. Fragmented governance systems, characterized by siloed decision-making and lack of coordination among stakeholders, represent a significant barrier to the integration of environmental engineering and eco-urbanism. Conversely, cities that adopt integrated governance models, incorporating cross-sectorial collaboration and participatory planning processes, demonstrate greater success in implementing sustainable urban strategies. Policy instruments such as regulatory frameworks, financial incentives, and urban development guidelines play a crucial role in facilitating the adoption of innovative technologies and design practices. The alignment of local, national, and international policies, particularly in the context of climate action and sustainable development goals, is essential for scaling up successful interventions (Yeh, A. G. O., & Li, X. 2017). Socio-economic factors also emerge as critical determinants of the success of integrated urban sustainability strategies. The results indicate that public awareness, community engagement, and stakeholder participation significantly influence the acceptance and effectiveness of environmental engineering and eco-urbanistic interventions. Inclusive planning processes that consider the needs and perspectives of diverse urban populations contribute to the development of equitable and socially resilient urban systems. Moreover, the integration of social considerations within technical and ecological frameworks enhances the overall sustainability of urban development, ensuring that environmental benefits are distributed fairly across different socio-economic groups (Joss, S., Tomozeiu, D., Cowley, R., & Hee Kim, J. 2013).

The comparative analysis reveals notable geographical variations in the implementation and outcomes of synergistic approaches. Developed regions, characterized by advanced technological capabilities and robust institutional frameworks, tend to exhibit higher levels of integration between environmental engineering and eco-urbanism. In contrast, developing regions often face challenges related to limited financial resources, inadequate infrastructure, and institutional constraints. Nevertheless, the results also highlight innovative approaches emerging from resource-constrained contexts, where decentralized and low-cost solutions, such as community-based water management systems and nature-based infrastructure, demonstrate significant potential for scalability and adaptability (Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. 2017).

An important aspect of the discussion pertains to the concept of resilience, which is increasingly recognized as a key objective of sustainable urban development. The integration of environmental engineering and eco-urbanism enhances urban resilience by enabling systems to anticipate, absorb, and recover from a wide range of disturbances, including climate-related hazards, economic shocks, and social disruptions. The findings indicate that resilience is not solely a function of technological robustness but also depends on the flexibility, redundancy, and adaptability of urban systems. Eco-urbanistic design principles, such as diversity, modularity, and connectivity, complement engineering solutions by fostering resilient urban structures capable of dynamic response to changing conditions (Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., et al. 2009).

Low-carbon development emerges as a central theme in the analysis, reflecting the urgent need to mitigate climate change through sustainable urbanization. The synergy between environmental engineering and eco-urbanism facilitates the transition toward low-carbon cities by integrating energy-efficient technologies, renewable energy systems, and sustainable urban design (Luederitz, C., Lang, D. J., & von Wehrden, H. 2017). The results demonstrate that such integrated approaches can achieve significant reductions in greenhouse gas emissions while simultaneously enhancing urban livability and economic competitiveness. However, the realization of low-carbon urban systems requires sustained policy support, investment in infrastructure, and behavioral changes at both individual and societal levels.

The study also identifies several limitations and challenges associated with the implementation of synergistic approaches. Technological complexity, high initial investment costs, and uncertainties related to long-term performance can hinder the adoption of innovative solutions. Additionally, the heterogeneity of urban contexts necessitates the customization of strategies to local conditions, which may limit the transferability of best practices. The need for interdisciplinary collaboration poses further challenges, as differences in disciplinary perspectives, methodologies, and terminologies can impede effective communication and integration (Marshall, S. 2016).

Despite these challenges, the findings underscore the transformative potential of integrating environmental engineering and eco-urbanism in addressing the complex and interrelated challenges of urban sustainability. The development of conceptual frameworks and analytical models that capture the dynamic interactions between engineered and ecological systems provides valuable tools for guiding urban planning and decision-making. Furthermore, the dissemination of knowledge and best practices through academic research, policy dialogues, and international collaboration is essential for accelerating the adoption of integrated approaches (McPhearson, T., Andersson, E., Elmqvist, T., & Frantzeskaki, N. 2015).

In synthesizing the results, it becomes evident that the synergy between environmental engineering and eco-urbanism is not merely an incremental enhancement of existing practices but represents a paradigm shift in the way urban systems are conceptualized, designed, and managed. This paradigm emphasizes the integration of technological innovation with ecological and social considerations, fostering the development of urban systems that are not only efficient and sustainable but also adaptive and resilient in the face of uncertainty.

The study contributes to the advancement of scientific knowledge by providing a comprehensive and nuanced understanding of the interactions between environmental engineering and eco-urbanism. It highlights the importance of adopting a systems-oriented perspective that recognizes the interconnectedness of urban components and the need for coordinated and collaborative approaches to urban development. As cities continue to evolve in response to global challenges, the integration of these disciplines will play a critical role in shaping sustainable and resilient urban futures.

Building upon the previously established analytical foundations, further examination of the synergistic integration between environmental engineering and eco-urbanism reveals deeper structural transformations occurring within contemporary urban systems. These transformations are not merely technological or spatial in nature but extend into the domains of urban metabolism, governance innovation, socio-ecological resilience, and long-term sustainability transitions. The extended analysis underscores that the effectiveness of this synergy is contingent upon the capacity of cities to internalize complexity, uncertainty, and nonlinearity as intrinsic characteristics of urban development processes (Metzger, J., & Decuyper, L. 2017).

A critical dimension that emerges with greater clarity is the reconceptualization of urban metabolism through the integration of circular economy principles and eco-urbanistic design. Urban metabolism, traditionally defined as the flow of energy, materials, water, and waste through urban systems, is undergoing a paradigm shift from linear throughput models toward closed-loop and regenerative cycles. Environmental engineering contributes advanced technological mechanisms for resource recovery, including nutrient recycling from wastewater, energy generation from organic waste, and material reclamation through high-efficiency recycling systems. Eco-urbanism complements these processes by spatially embedding circularity within urban form, promoting localized production-consumption cycles, urban agriculture, and decentralized infrastructure networks. The interplay between these domains facilitates a transition toward cities that function as self-sustaining ecosystems, reducing external resource dependency and minimizing environmental externalities (World Bank. 2019).

The concept of decentralized infrastructure systems warrants particular attention within this extended discussion. Traditional centralized systems, while efficient in terms of scale, often exhibit vulnerabilities related to systemic failures, high capital investment requirements, and limited adaptability to local conditions. In contrast, decentralized systems—such as modular wastewater treatment units, distributed renewable energy generation, and localized stormwater management—enhance flexibility, redundancy, and context-specific responsiveness. Environmental engineering innovations enable the technical feasibility and operational efficiency of such systems, while eco-urbanism ensures their integration within the spatial and social fabric of urban environments. Empirical observations indicate that decentralized systems significantly enhance urban resilience, particularly in the face of climate-induced disruptions and infrastructural stress (Olsson, P., Folke, C., & Berkes, F. 2004).

Another critical area of advancement is the integration of climate-responsive and nature-based solutions within urban systems. Nature-based solutions, including green corridors, urban wetlands, reforestation initiatives, and blue-green infrastructure networks, exemplify the convergence of ecological processes and engineered interventions (Wong, C., & Chen, X. 2015). These solutions provide multifunctional benefits, addressing not only environmental challenges such as flooding, heat stress, and air pollution but also contributing to social well-being, public health, and urban aesthetics. The results suggest that cities incorporating nature-based solutions within their environmental engineering frameworks demonstrate enhanced adaptive capacity and reduced vulnerability to climate risks. Moreover, the co-benefits associated with these interventions—such as carbon sequestration, biodiversity enhancement, and recreational opportunities—underscore their value as integral components of sustainable urban systems (Pelling, M. 2011).

The role of innovation ecosystems and technological convergence further amplifies the potential of synergistic approaches. The integration of artificial intelligence, machine learning, and big data analytics within environmental engineering systems enables predictive modeling, optimization, and real-time decision-making (Wheeler, S. M., & Beatley, T. 2014). These capabilities are particularly relevant in managing complex urban systems characterized by dynamic interactions and feedback loops. For instance, predictive analytics can optimize energy consumption patterns, enhance water distribution efficiency, and improve waste management logistics. Eco-urbanism leverages these technological advancements to inform spatial planning, urban design, and policy development, ensuring that technological solutions are aligned with broader sustainability objectives. However, this technological convergence also necessitates critical reflection on ethical considerations, data governance, and the potential for technological dependency (Ranganathan, J., Raustiala, K., & Sagar, A. 2018).

From a governance perspective, the extended findings highlight the emergence of adaptive and collaborative governance models as essential enablers of integrated urban sustainability. Traditional hierarchical governance structures are increasingly being supplemented by network-based approaches

that facilitate collaboration among public institutions, private sector actors, academic entities, and civil society organizations. These multi-stakeholder frameworks enable the co-creation of knowledge, the sharing of resources, and the alignment of diverse interests toward common sustainability goals. Environmental engineering projects, often requiring significant investment and technical expertise, benefit from such collaborative arrangements, while eco-urbanistic initiatives gain legitimacy and social acceptance through participatory processes. The integration of governance innovation with technical and ecological strategies thus represents a critical dimension of successful urban transformation (Van Meerkerk, I., & Edelenbos, J. 2014).

Socio-cultural dynamics also play a pivotal role in shaping the outcomes of synergistic approaches. The adoption of sustainable technologies and urban design practices is influenced not only by economic and regulatory factors but also by cultural values, behavioral patterns, and public perceptions. The results indicate that cities fostering a culture of sustainability—through education, awareness campaigns, and community engagement—are more likely to achieve successful integration of environmental engineering and eco-urbanism. Behavioral changes, such as reduced energy consumption, increased recycling, and the use of sustainable transportation modes, complement technological and infrastructural interventions, enhancing their overall effectiveness. This highlights the importance of integrating social sciences within the broader framework of urban sustainability research.

The economic dimension of integrated urban systems presents both opportunities and challenges. On one hand, the implementation of sustainable infrastructure and eco-urbanistic design can stimulate economic growth through job creation, innovation, and the development of green industries. Investments in renewable energy, green construction, and sustainable transportation contribute to the emergence of new economic sectors and value chains. On the other hand, the initial costs associated with such investments can be substantial, posing challenges for municipalities with limited financial resources. The analysis suggests that innovative financing mechanisms, including public-private partnerships, green bonds, and climate finance instruments, are essential for overcoming financial barriers and scaling up sustainable urban initiatives.

A further layer of complexity is introduced by the need to address equity and inclusivity within sustainable urban development. While the integration of environmental engineering and eco-urbanism offers significant environmental and economic benefits, there is a risk that these benefits may not be equitably distributed across different segments of the population. For instance, the development of green infrastructure and eco-friendly neighborhoods may lead to increased property values and gentrification, potentially displacing vulnerable communities. The findings emphasize the importance of incorporating equity considerations within planning and decision-making processes, ensuring that sustainability initiatives contribute to social justice and inclusive development. This requires targeted policies, community engagement, and the integration of social impact assessments within project evaluation frameworks (Satterthwaite, D. 2008).

The global perspective provided by the comparative analysis reveals that the principles of synergy between environmental engineering and eco-urbanism are universally applicable but must be adapted to local contexts. Climatic conditions, cultural norms, economic structures, and governance systems all influence the design and implementation of sustainable urban strategies. For example, arid regions may prioritize water conservation and desalination technologies, while coastal cities may focus on flood protection and climate adaptation measures. The adaptability of integrated approaches to diverse contexts underscores their relevance as a global framework for sustainable urban development (Seto, K. C., Sánchez-Rodríguez, R., & Fragkias, M. 2010).

An additional dimension explored in this extended discussion is the role of education and capacity building in facilitating the integration of environmental engineering and eco-urbanism. The complexity of contemporary urban challenges necessitates a new generation of professionals equipped with interdisciplinary knowledge and skills. Educational institutions play a critical role in fostering such competencies through integrated curricula, research initiatives, and collaborative learning environments. Capacity building at the institutional and community levels is equally important, enabling stakeholders to effectively participate in and contribute to sustainable urban development processes (United Nations. 2015).

The long-term implications of the synergy between environmental engineering and eco-urbanism extend beyond immediate sustainability outcomes, influencing the trajectory of urban evolution. The transition

toward adaptive, low-carbon, and resilient urban systems represents a fundamental shift in the relationship between humans and the environment. Cities are increasingly being conceptualized not as static entities but as dynamic, living systems capable of continuous adaptation and transformation. This perspective aligns with emerging theories in sustainability science, which emphasize resilience, adaptability, and transformation as key attributes of complex systems (Solecki, W., Leichenko, R., & O'Brien, K. 2011).

In synthesizing these extended findings, it becomes evident that the integration of environmental engineering and eco-urbanism operates across multiple scales, from individual buildings and neighborhoods to entire metropolitan regions and global networks. The scalability of integrated solutions is facilitated by modular design, standardization, and the dissemination of best practices, enabling cities to replicate and adapt successful models. At the same time, the interconnectedness of urban systems necessitates coordinated action at regional and global levels, particularly in addressing transboundary environmental challenges such as climate change and resource depletion.

The extended discussion reinforces the notion that the synergy between environmental engineering and eco-urbanism is not a static or prescriptive model but an evolving framework that must continuously adapt to emerging challenges and opportunities. The rapid pace of technological innovation, coupled with the increasing urgency of environmental issues, requires ongoing research, experimentation, and learning. Future research directions may include the exploration of advanced materials, bio-inspired engineering solutions, and the integration of social-ecological systems theory within urban planning and design (UN Habitat. 2020).

The extended results and discussion provide a comprehensive and nuanced understanding of the multifaceted interactions between environmental engineering and eco-urbanism. The findings highlight the transformative potential of integrated approaches in addressing the complex challenges of urban sustainability, while also acknowledging the inherent complexities and uncertainties associated with such endeavors. By embracing a systems-oriented, interdisciplinary, and adaptive perspective, cities can leverage the synergy between these domains to create urban environments that are not only sustainable and resilient but also equitable, innovative, and responsive to the needs of present and future generations. The intersection of environmental engineering and eco-urbanism represents a transformative paradigm in contemporary urban development, one that moves beyond traditional, fragmented approaches toward integrated, adaptive, and resilient systems. This discussion critically examines the multifaceted implications, mechanisms, and challenges of this synergy, highlighting how the integration of technical, ecological, social, and governance dimensions contributes to sustainable urban transformation. The analysis draws upon the theoretical frameworks, empirical evidence, and global best practices outlined in the preceding results and extended discussion, situating them within the broader discourse of urban sustainability, resilience, and low-carbon development.

At the core of this integration is the recognition that urban systems function as complex socio-ecological-technological systems. Environmental engineering provides the technical capabilities required for efficient resource management, including water treatment, renewable energy systems, waste recycling, and pollution control. Eco-urbanism, in contrast, emphasizes the spatial, ecological, and human-centered design principles necessary to embed these solutions within the urban fabric effectively. The discussion of synergy, therefore, focuses on the complementarity of these domains: engineering ensures operational feasibility and technical efficiency, while eco-urbanism ensures ecological compatibility, social acceptance, and aesthetic integration. This complementarity enables cities to transition from linear, resource-intensive systems to circular, regenerative, and climate-responsive urban metabolisms.

A significant dimension of this discussion is urban resilience. The integration of decentralized infrastructure, modular systems, and nature-based solutions contributes to enhanced adaptability and flexibility. Decentralized systems reduce dependency on centralized networks that are vulnerable to systemic failures and environmental shocks. Modular approaches allow for incremental expansion, technological upgrades, and context-specific adaptation, increasing the overall resilience of urban infrastructure. Nature-based solutions, including urban green spaces, wetlands, and vegetative buffers, provide multifunctional benefits, addressing climate risks, enhancing biodiversity, and improving public health outcomes. Importantly, these interventions generate co-benefits that extend beyond

environmental objectives, including social cohesion, recreational opportunities, and psychological well-being, thereby reinforcing the multidimensional value of integrated urban strategies.

Energy transition and low-carbon development are closely interlinked with these concepts. Cities are responsible for a substantial share of global greenhouse gas emissions, necessitating comprehensive interventions to mitigate climate change. The integration of renewable energy generation, energy-efficient technologies, and eco-urbanistic planning fosters low-carbon urban forms. Compact city designs, mixed-use development, and transit-oriented planning reduce transportation-related emissions while supporting resource-efficient land use. Additionally, real-time monitoring and smart technologies facilitate predictive energy management, optimizing consumption patterns and improving operational efficiency. The discussion highlights that the success of low-carbon strategies is contingent upon their alignment with broader urban design principles, social behavior patterns, and governance frameworks. Governance emerges as a critical factor in the discussion of integrated urban sustainability. Traditional hierarchical governance structures often impede cross-sectorial coordination and inhibit holistic planning. The analysis demonstrates that adaptive, networked, and participatory governance models are essential to facilitate collaboration among public authorities, private actors, academic institutions, and civil society. Multi-stakeholder engagement enhances the legitimacy of sustainability interventions, supports resource mobilization, and promotes co-creation of knowledge. Furthermore, regulatory frameworks that integrate environmental, social, and economic objectives can ensure coherence across planning, design, and implementation processes. The discussion emphasizes that governance innovation is not only a facilitator of technical integration but also a determinant of equitable and socially inclusive outcomes.

Equity and inclusivity constitute another central theme. Sustainable urban development cannot be achieved solely through technological innovation and ecological design; social considerations must be embedded into planning and decision-making processes. The benefits of integrated urban interventions—such as improved air quality, access to green spaces, and reduced energy costs—must be equitably distributed to avoid reinforcing existing social disparities. Participatory planning, community engagement, and social impact assessments are recommended to ensure that vulnerable populations are included in decision-making processes and that interventions do not result in gentrification or displacement. The discussion underscores that sustainability and social equity are mutually reinforcing objectives: socially inclusive urban systems are more resilient, adaptive, and broadly supported.

Economic and financial dimensions are equally pertinent. The implementation of integrated solutions often involves substantial upfront investment in technology, infrastructure, and design. Innovative financing mechanisms, including public-private partnerships, green bonds, and climate finance instruments, are critical to overcoming financial barriers. Simultaneously, investment strategies should consider long-term economic, social, and environmental returns, emphasizing cost-effectiveness, resource efficiency, and co-benefits. The discussion highlights that financial sustainability is inseparable from technical and ecological sustainability, as long-term urban resilience and low-carbon transitions require consistent and scalable resource allocation.

The analysis also emphasizes the role of technological innovation in enabling the synergy between environmental engineering and eco-urbanism. Emerging technologies such as smart grids, sensor networks, artificial intelligence, and data analytics facilitate real-time monitoring, predictive modeling, and adaptive management of urban systems. These tools enhance the capacity of cities to anticipate and respond to environmental, social, and economic dynamics. However, the discussion cautions against over-reliance on technology, noting the importance of integrating human, institutional, and ecological considerations to ensure sustainable outcomes. Ethical considerations, data governance, and public trust are identified as essential components in the responsible application of technology within urban systems. From a global perspective, the discussion acknowledges that while principles of integration are universally relevant, local adaptation is critical. Climatic, ecological, cultural, and institutional contexts influence the design and implementation of interventions. Arid regions may prioritize water conservation and alternative energy solutions, while coastal cities may focus on flood mitigation and ecosystem-based adaptation. The ability to tailor integrated strategies to local needs enhances effectiveness, fosters community engagement, and ensures sustainability over time.

Education, capacity building, and knowledge dissemination are highlighted as long-term enablers. Professionals equipped with interdisciplinary expertise in engineering, ecology, planning, and social sciences are essential to design, implement, and maintain integrated urban systems. Moreover, public education and awareness programs encourage sustainable behaviors, community participation, and acceptance of urban interventions. Knowledge sharing across cities and regions can accelerate the adoption of best practices, innovation diffusion, and policy learning.

The study affirms that the integration of environmental engineering and eco-urbanism offers a robust framework for addressing the complex challenges of urban sustainability, resilience, and climate adaptation. The synergy produces multifunctional, low-carbon, adaptive, and socially inclusive urban systems that are capable of responding to contemporary and future environmental, economic, and social pressures. While challenges related to governance, finance, technology, and equity persist, the evidence indicates that these can be mitigated through interdisciplinary collaboration, participatory planning, adaptive management, and context-specific strategies. Ultimately, the discussion underscores that achieving sustainable urban transformation requires continuous learning, innovation, and coordinated action across multiple scales and stakeholders, establishing a foundation for cities that are resilient, equitable, and environmentally sustainable.

The cumulative evidence synthesized throughout this review unequivocally demonstrates that the convergence of environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism represents a transformative scientific paradigm that extends well beyond conventional urban planning or isolated environmental protection measures. Rather than functioning as independent scientific domains, these disciplines increasingly operate as mutually reinforcing components of integrated socio-ecological systems capable of simultaneously addressing climate change, biodiversity degradation, environmental pollution, infrastructure vulnerability, resource scarcity, and rapid urbanization. The reviewed literature consistently indicates that sustainable cities emerge not from individual technological innovations alone but through the coordinated interaction of scientific knowledge, engineering excellence, ecological intelligence, digital transformation, and adaptive governance. This integrated perspective fundamentally reshapes the scientific understanding of urban systems by recognizing cities as continuously evolving networks characterized by reciprocal interactions among natural ecosystems, engineered infrastructure, human populations, institutional structures, and environmental processes.

One of the most important scientific observations arising from the literature concerns the evolution of environmental engineering from a discipline primarily concerned with environmental remediation toward one focused increasingly on environmental regeneration. Earlier engineering interventions frequently concentrated on minimizing damage after pollution had already occurred. Wastewater treatment facilities removed contaminants before discharge, emission control technologies reduced industrial pollution, and waste disposal systems attempted to manage increasing volumes of municipal refuse. Contemporary environmental engineering, however, increasingly emphasizes regenerative approaches that actively restore ecosystem functionality while preventing environmental degradation before irreversible impacts develop. This philosophical transition reflects broader scientific recognition that ecological restoration provides greater long-term environmental, economic, and societal benefits than remediation alone.

The reviewed studies demonstrate that regenerative engineering principles increasingly influence infrastructure planning, landscape architecture, water management, transportation systems, energy production, and urban development. Restored wetlands improve biodiversity while functioning as advanced wastewater treatment systems. Urban forests enhance climate regulation while strengthening public health and ecological connectivity. Regenerated river corridors reduce flood risks while simultaneously improving recreational opportunities, water quality, and habitat diversity. Such multifunctional engineering solutions illustrate the growing capacity of environmental engineering to generate positive ecological outcomes rather than merely minimizing environmental damage.

An equally significant finding concerns the increasing importance of systems integration across multiple infrastructure sectors. Scientific investigations consistently demonstrate that transportation, water management, energy generation, communications, housing, healthcare, waste management, and ecological systems cannot be planned independently because decisions affecting one subsystem

frequently generate consequences throughout the broader urban environment. Systems engineering methodologies therefore provide increasingly valuable frameworks for understanding complex interdependencies and optimizing overall urban performance.

For example, renewable energy integration directly influences transportation electrification, building performance, industrial productivity, greenhouse gas emissions, and public health. Green infrastructure simultaneously affects stormwater management, biodiversity conservation, thermal regulation, air quality improvement, and recreational accessibility. Circular economy initiatives reduce waste generation while improving resource security, industrial competitiveness, and environmental sustainability. Such interconnected relationships emphasize that successful environmental engineering increasingly requires interdisciplinary optimization rather than sector-specific problem solving.

The literature further indicates that adaptive capacity has become one of the defining characteristics distinguishing resilient cities from vulnerable urban environments. Adaptive capacity encompasses technological flexibility, institutional learning, scientific innovation, governance responsiveness, financial resilience, ecological stability, and community engagement. Unlike static engineering systems optimized exclusively for predetermined operating conditions, adaptive urban systems continuously respond to changing environmental conditions through monitoring, learning, evaluation, and iterative improvement.

Scientific evidence demonstrates that adaptive management significantly improves infrastructure performance under uncertain climatic conditions. Continuous environmental monitoring enables engineers to detect emerging trends before they develop into critical failures. Predictive analytics facilitate proactive maintenance rather than reactive emergency interventions. Artificial intelligence continuously optimizes infrastructure operations according to changing environmental conditions, while digital twins simulate future scenarios that inform strategic planning and investment decisions. Collectively, these technological capabilities substantially improve operational reliability while reducing environmental risks and maintenance expenditures.

Another important discussion emerging from the reviewed investigations concerns the increasing scientific recognition of ecosystem services as fundamental engineering assets rather than passive environmental features. Historically, many engineering projects regarded natural ecosystems primarily as physical constraints limiting infrastructure development. Contemporary research demonstrates precisely the opposite relationship. Ecosystems actively perform valuable engineering functions including flood attenuation, groundwater recharge, carbon sequestration, climate regulation, nutrient cycling, erosion prevention, water purification, pollination, biodiversity conservation, and thermal regulation. Quantifying these ecosystem services has fundamentally altered environmental engineering by demonstrating their measurable economic and infrastructural value.

Urban forests provide particularly compelling examples of multifunctional ecosystem services. Scientific evaluations consistently demonstrate that appropriately designed urban forests reduce atmospheric carbon concentrations, intercept particulate matter, moderate urban heat islands, enhance biodiversity, stabilize soils, reduce stormwater runoff, improve psychological well-being, and strengthen social cohesion. Similar multifunctionality characterizes green roofs, ecological corridors, restored wetlands, permeable pavements, bioswales, rain gardens, and riparian restoration projects. Environmental engineering increasingly incorporates these ecological systems as essential infrastructure components rather than optional aesthetic enhancements.

The reviewed literature also emphasizes the rapidly expanding role of environmental genomics, molecular biology, and microbiome science within environmental engineering. Advances in DNA sequencing technologies have substantially improved understanding of microbial communities responsible for nutrient cycling, contaminant degradation, wastewater treatment, methane production, carbon sequestration, and ecosystem restoration. Environmental engineers increasingly employ genomic technologies to optimize biological treatment processes, monitor ecosystem health, detect emerging contaminants, evaluate biodiversity, and improve ecological restoration outcomes.

Scientific investigations indicate that microbial ecology will likely become increasingly important for future sustainable cities. Biological wastewater treatment systems continue improving through enhanced understanding of microbial metabolism. Constructed wetlands increasingly utilize ecological succession principles to maximize pollutant removal while strengthening biodiversity. Soil microbiomes contribute to carbon storage, nutrient cycling, and vegetation establishment within restored urban landscapes. Such

findings illustrate how natural sciences continue expanding opportunities for biologically inspired engineering innovation.

The discussion further demonstrates that environmental engineering increasingly intersects with public health sciences through recognition of environmental determinants of human well-being. Urban environmental quality directly influences respiratory diseases, cardiovascular disorders, neurological health, infectious disease transmission, thermal stress, mental health, physical activity, and overall quality of life. Consequently, environmental engineering interventions increasingly prioritize health co-benefits alongside traditional engineering objectives.

Cleaner transportation systems reduce particulate matter and nitrogen oxide exposure while encouraging active mobility. Green infrastructure lowers urban temperatures, reducing heat-related illnesses. Improved wastewater treatment minimizes pathogen transmission and antimicrobial resistance dissemination. Sustainable housing enhances indoor environmental quality while reducing energy poverty. These integrated outcomes demonstrate that environmental engineering functions increasingly as a preventive public health discipline supporting healthier urban populations through improvements in environmental quality.

An equally important observation concerns the growing integration of environmental economics within sustainable engineering decision-making. Earlier engineering evaluations frequently emphasized construction expenditures and operational efficiency while underestimating long-term environmental externalities. Contemporary sustainability assessments increasingly incorporate ecosystem valuation, carbon pricing, life-cycle costing, resource efficiency analysis, environmental accounting, and natural capital evaluation. Scientific evidence consistently demonstrates that environmentally sustainable infrastructure frequently produces superior long-term economic performance despite occasionally requiring greater initial investment.

Life-cycle economic analyses reveal substantial financial benefits arising from reduced maintenance requirements, improved energy efficiency, lower disaster recovery expenditures, enhanced public health, increased property values, improved resource productivity, and avoided environmental remediation costs. Consequently, sustainability increasingly represents an economically rational engineering strategy rather than merely an environmental objective.

The reviewed studies similarly identify governance innovation as an essential determinant of successful urban sustainability. Effective implementation of adaptive infrastructure depends not only upon technological capability but equally upon institutional coordination, policy consistency, financial investment, regulatory flexibility, scientific communication, stakeholder participation, and transparent decision-making. Fragmented governance structures frequently impede interdisciplinary collaboration by separating environmental management, infrastructure development, transportation planning, housing, energy policy, and public health administration into independent institutional sectors.

Adaptive governance seeks to overcome these limitations through integrated planning frameworks emphasizing continuous scientific evaluation, stakeholder engagement, policy learning, institutional flexibility, and evidence-based decision-making. Scientific investigations consistently demonstrate that cities characterized by collaborative governance structures generally exhibit greater resilience, improved environmental performance, and more effective climate adaptation than cities relying upon highly centralized or fragmented administrative systems.

The literature also emphasizes significant opportunities associated with international scientific collaboration. Environmental engineering challenges such as climate change, atmospheric pollution, biodiversity loss, marine degradation, freshwater scarcity, and resource depletion transcend national boundaries and therefore require coordinated international responses. Collaborative research programs accelerate technological innovation, facilitate knowledge exchange, harmonize engineering standards, strengthen scientific capacity, and support transfer of sustainable technologies across diverse socioeconomic contexts.

Nevertheless, several persistent challenges remain evident throughout the reviewed investigations. Financial limitations continue restricting implementation of advanced environmental technologies within many developing regions. Institutional fragmentation frequently impedes interdisciplinary collaboration despite widespread recognition of its importance. Regulatory frameworks often evolve more slowly than technological innovation, creating governance uncertainties surrounding artificial intelligence, autonomous infrastructure, environmental data management, and digital engineering

systems. Climate uncertainty continues challenging conventional engineering methodologies by introducing environmental conditions extending beyond historical observations.

Scientific uncertainty also remains inherent within projections concerning long-term ecosystem responses, technological evolution, demographic change, and socioeconomic development. Consequently, environmental engineering increasingly emphasizes adaptive management capable of incorporating new scientific evidence throughout infrastructure lifecycles rather than relying exclusively upon static engineering assumptions established during initial planning stages.

Another emerging scientific priority concerns education and professional competency development. Future environmental engineers must increasingly possess interdisciplinary expertise extending across engineering sciences, climatology, ecology, computational modeling, artificial intelligence, environmental chemistry, microbiology, sustainability assessment, economics, policy analysis, and communication sciences. Universities worldwide continue restructuring educational curricula to reflect these expanding professional requirements, emphasizing systems thinking, interdisciplinary collaboration, digital technologies, climate adaptation, and sustainability science.

From a broader scientific perspective, the reviewed evidence indicates that future research should prioritize development of integrated assessment methodologies capable of simultaneously evaluating environmental, economic, technological, ecological, institutional, and public health outcomes. Artificial intelligence should increasingly support predictive environmental management while maintaining transparency, scientific accountability, and ethical governance. Nature-based solutions require further optimization through long-term ecological monitoring and engineering evaluation. Climate adaptation strategies should increasingly incorporate uncertainty analysis, scenario planning, and adaptive infrastructure capable of continuous evolution in response to changing environmental conditions.

The findings further suggest that environmental engineering will increasingly contribute to achieving carbon neutrality through expansion of renewable energy systems, carbon capture technologies, circular resource management, sustainable construction, intelligent transportation, regenerative agriculture, ecological restoration, and ecosystem conservation. Simultaneously, engineering and natural sciences will continue advancing understanding of Earth system processes, biodiversity dynamics, climate feedback mechanisms, and ecological resilience, thereby strengthening the scientific foundation supporting sustainable urban development.

This review strongly supports the conclusion that environmental engineering, engineering and natural sciences, and eco-urbanism have entered an era of unprecedented interdisciplinary convergence. This convergence establishes a comprehensive scientific framework capable of transforming contemporary cities into adaptive, low-carbon, resilient, sustainable, and climate-responsive urban systems. Future urban success will increasingly depend upon the capacity of engineers, environmental scientists, urban planners, ecologists, policymakers, economists, public health specialists, and local communities to collaborate across disciplinary boundaries while integrating technological innovation with ecological intelligence and evidence-based governance.

The scientific discourse reviewed in this study therefore confirms that sustainable urban development should no longer be interpreted merely as an environmental aspiration but rather as an achievable engineering objective supported by robust scientific evidence, rapidly advancing technologies, and continuously expanding interdisciplinary knowledge. The continued integration of environmental engineering with engineering and natural sciences will remain essential for developing cities capable of preserving environmental integrity, strengthening climate resilience, promoting social equity, enhancing economic prosperity, and safeguarding the well-being of present and future generations in an increasingly urbanized and environmentally dynamic world.

Summary and Analysis

This study systematically examines the synergistic integration of environmental engineering and eco-urbanism, emphasizing their collective role in shaping adaptive, low-carbon, and resilient urban systems. The research spans conceptual frameworks, technological innovations, ecological design principles, governance structures, socio-economic dynamics, and case studies from both developed and developing urban contexts. The comprehensive findings underscore that contemporary urban sustainability requires an integrated, interdisciplinary approach rather than fragmented, discipline-specific interventions.

Summary of Key Findings:

- **Synergy and Integration:** Environmental engineering provides technical solutions for water, energy, waste, and material management, while eco-urbanism ensures these solutions are embedded within ecological, spatial, and socio-cultural frameworks. The integration creates multifunctional urban systems capable of adaptive response to environmental and socio-economic challenges.
- **Resource Efficiency and Circularity:** The research highlights the shift from linear to circular urban metabolism. Techniques like water recycling, waste-to-energy, and localized resource recovery, combined with eco-urban design, reduce dependency on external resources and lower environmental impact.
- **Resilience and Adaptation:** Decentralized infrastructure, nature-based solutions, and smart technologies enhance resilience. Cities employing these strategies exhibit improved capacity to anticipate, absorb, and recover from climate events, economic shocks, and social disruptions.
- **Low-Carbon Urban Systems:** Integrating energy-efficient engineering solutions and eco-urbanistic principles reduces greenhouse gas emissions while maintaining economic performance and livability. Compact urban forms, renewable energy, and smart grids contribute significantly to carbon reduction strategies.
- **Governance and Collaboration:** Effective integration requires adaptive, multi-stakeholder governance, where public institutions, private actors, and civil society collaboratively implement urban sustainability strategies. Fragmented governance is identified as a critical barrier.
- **Socio-Economic and Equity Considerations:** Public participation, cultural norms, and social inclusivity are essential for sustainable adoption of technical solutions. Equity-focused planning ensures benefits are distributed fairly, mitigating risks of gentrification or social disparity.
- **Global Relevance and Contextual Adaptation:** While principles of integration are universally applicable, local context—climatic, economic, cultural, and institutional—shapes implementation strategies. Resource-constrained regions often adopt innovative, decentralized, low-cost solutions with high adaptability potential.

Analysis:

The study demonstrates that integrating environmental engineering and eco-urbanism is not a simple additive process but a dynamic, systemic transformation of urban development. By converging technological innovation with ecological design and socio-economic inclusivity, cities move toward a paradigm of urban sustainability that is regenerative, adaptive, and resilient. This approach aligns with emerging theories in socio-ecological systems, resilience science, and circular economy, offering a roadmap for sustainable urban futures.

Challenges persist, including technological complexity, financial constraints, institutional fragmentation, and ensuring equity. However, the potential benefits—reduced environmental impact, improved urban resilience, enhanced livability, and socio-economic co-benefits—strongly outweigh the limitations. The study highlights the critical need for interdisciplinary research, data-driven decision-making, and continuous adaptation of governance and planning mechanisms to ensure effective implementation.

The synergy between environmental engineering and eco-urbanism emerges as a robust and transformative framework for future urban development, capable of addressing global sustainability challenges while promoting adaptive, equitable, and low-carbon cities.

Conclusion

- The present study provides a comprehensive and systematic examination of the synergistic interactions between environmental engineering and eco-urbanism, highlighting their collective capacity to advance adaptive, low-carbon, and resilient urban systems. The findings clearly demonstrate that the integration of these two domains represents a transformative paradigm in contemporary urban development, moving beyond fragmented and discipline-specific approaches toward a holistic, systems-oriented framework. This convergence enables the alignment of technological innovation with ecological design and socio-economic considerations, thereby fostering more sustainable and future-ready urban environments.
- The analysis underscores that environmental engineering contributes critical technical solutions, including resource-efficient infrastructure, renewable energy systems, advanced water and waste

management technologies, and data-driven optimization tools. Simultaneously, eco-urbanism provides the spatial, ecological, and human-centered design principles necessary to ensure that these technologies are effectively embedded within the urban fabric. The resulting synergy facilitates the transition from linear and resource-intensive urban models to circular, regenerative, and climate-responsive systems capable of addressing the complex challenges of the 21st century.

- A key conclusion emerging from this study is that resilience and adaptability are central to sustainable urban development. The integration of decentralized infrastructure, nature-based solutions, and smart technologies enhances the capacity of urban systems to anticipate, absorb, and recover from environmental and socio-economic disruptions. Moreover, the emphasis on low-carbon strategies—through energy efficiency, renewable integration, and sustainable urban form—demonstrates significant potential for mitigating climate change while simultaneously improving urban livability and economic performance.
- However, the study also identifies critical challenges that must be addressed to fully realize the potential of this synergy. These include institutional fragmentation, financial constraints, technological disparities, and the need for interdisciplinary collaboration. Furthermore, issues of social equity and inclusivity remain central concerns, as the benefits of sustainable urban development must be equitably distributed to avoid exacerbating existing inequalities. Addressing these challenges requires coherent policy frameworks, innovative financing mechanisms, stakeholder engagement, and capacity-building initiatives at multiple governance levels.
- The integration of environmental engineering and eco-urbanism offers a robust and dynamic pathway toward sustainable urban transformation. By embracing a multidisciplinary and adaptive approach, cities can effectively navigate the complexities of modern urbanization and climate change. The continued advancement of research, policy, and practice in this field will be essential for shaping resilient, inclusive, and environmentally sustainable urban futures for generations to come.

Recommendations

- Based on the comprehensive analysis of the synergy between environmental engineering and eco-urbanism, several strategic recommendations emerge to guide policymakers, urban planners, engineers, and researchers toward the development of adaptive, low-carbon, and resilient urban systems. These recommendations emphasize integrated approaches, cross-disciplinary collaboration, and context-specific interventions, while also addressing governance, technological, social, and financial considerations.
- It is recommended that urban development strategies fully embrace a systems-oriented, interdisciplinary approach. Traditional soloed methods, in which environmental engineering and urban planning operate independently, are insufficient to address the multifaceted challenges of contemporary cities. Urban policies should actively promote the integration of engineering solutions, ecological design, and socio-economic considerations. For instance, infrastructure planning should simultaneously address water, energy, and waste management while incorporating green infrastructure and spatial design principles that enhance biodiversity, ecosystem services, and climate adaptation. Establishing formal frameworks for cross-disciplinary collaboration within municipal planning departments can facilitate the seamless integration of technical and ecological objectives.
- Cities should prioritize the adoption of decentralized and modular infrastructure systems. Decentralized water treatment, localized energy generation, and distributed waste management systems enhance flexibility, redundancy, and resilience. Such systems are particularly advantageous in contexts subject to climate variability, extreme weather events, or resource constraints. Environmental engineering technologies should be deployed in a manner that allows for modular expansion and adaptive operation, while eco-urbanistic design ensures their integration within urban landscapes in ways that maintain social acceptance and accessibility.
- The implementation of nature-based solutions and green infrastructure should be systematically incorporated into urban development plans. Urban forests, green roofs, permeable pavements, and wetland systems not only provide environmental benefits such as storm water mitigation, air quality improvement, and carbon sequestration but also improve public health and social well-being. To maximize effectiveness, these interventions must be contextually adapted to local climatic, ecological, and socio-cultural conditions, ensuring multifunctionality and equitable access.

- Strengthening governance mechanisms and institutional coordination is essential for successful implementation. Fragmented governance structures hinder the effective integration of environmental engineering and eco-urbanism. Cities should adopt adaptive governance frameworks that encourage stakeholder participation, cross-sectoral collaboration, and data-informed decision-making. This includes establishing participatory planning processes that engage communities, private sector actors, research institutions, and non-governmental organizations. Transparent regulatory frameworks and policy alignment across local, national, and international levels can further support the scaling of successful interventions.
- Promoting financial innovation and investment strategies is critical to overcoming cost barriers. Sustainable urban infrastructure often requires substantial upfront investment. Public-private partnerships, green bonds, climate financing, and incentive schemes can mobilize resources while ensuring long-term sustainability. Financial mechanisms should also consider the equitable distribution of costs and benefits to avoid exacerbating social inequalities.
- Emphasis should be placed on education, capacity building, and knowledge dissemination. Professionals trained in both environmental engineering and eco-urbanism are essential to implement integrated solutions effectively. Urban residents should be educated and engaged to adopt sustainable behaviors, such as water conservation, energy efficiency, and waste reduction. Knowledge sharing through research collaborations, pilot projects, and international networks can accelerate the adoption of innovative practices.
- Continuous monitoring, evaluation, and adaptive management are recommended to ensure long-term success. Real-time data collection, predictive modeling, and feedback mechanisms can inform adjustments to infrastructure, policy, and urban design, ensuring resilience to environmental, social, and economic changes. Establishing metrics for sustainability, resilience, and equity allows cities to assess progress, identify gaps, and refine interventions over time.
- The recommendations collectively emphasize an integrated, adaptive, and inclusive approach to urban development. By implementing these strategies, cities can leverage the synergy between environmental engineering and eco-urbanism to create urban systems that are not only environmentally sustainable and low-carbon but also resilient, equitable, and capable of supporting the complex demands of contemporary and future urban populations.

References

1. Alberti, M. (2008). *Advances in urban ecology: Integrating humans and ecological processes in urban ecosystems*. Springer.
2. Alghamdi, S. A. (2020). Urban resilience: Policies, challenges and perspectives. *Habitat International*, 99, 102162.
3. Bai, X., Dawson, R. J., Ürge-Vorsatz, D., et al. (2018). Six research priorities for cities and climate change. *Nature*, 555(7694), 23–25.
4. Beatley, T. (2011). *Biophilic cities: Integrating nature into urban design and planning*. Island Press.
5. Blanco, H., Alberti, M., Forsyth, A., et al. (2009). *Correlation or causality between urban development patterns and environmental quality*. Lincoln Institute of Land Policy.
6. Bournakis, I., Karanikolas, P., & Komilis, D. (2019). A review of bio-inspired materials and solutions for sustainable urban infrastructure. *Sustainable Materials and Technologies*, 21, e00109.
7. Brabec, E., Schnepel, K. T., & Breuste, J. (2017). Ecosystem services in urban landscapes: Practical applications and governance implications. *Landscape Ecology*, 32(9), 1521–1527.
8. Campbell, S. (2006). Green cities, growing cities, just cities?: Urban planning and the contradictions of sustainable development. *Journal of the American Planning Association*, 62(3), 296–312.
9. Carrus, G., Scopelliti, M., & Laforteza, R. (2017). Urban green infrastructure for sustainable and equitable cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 24, 1–8.
10. Colding, J. (2011). The role of ecosystem services in contemporary urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 209–217.
11. Dalkmann, H., & Brannigan, C. (2007). Transport and climate change: Supporting documentation—A review of the GHG emissions from transport. *TER Technical Report*.
12. Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L. J., et al. (2012). Resilience: A bridging concept or a dead end? *European Planning Studies*, 20(1), 1–11.

13. Dewulf, A., & Mostert, E. (2010). Ten challenges for public administration in complex environmental situations. *Public Administration*, 88(3), 625–633.
14. Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., et al. (2013). *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities*. Springer.
15. Evans, J. P. (2011). *Resilience, ecology, and adaptation in urban landscapes*. Wiley.
16. Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253–267.
17. Fuenfschilling, L., & Truffer, B. (2014). The structuration of socio-technical regimes. *Research Policy*, 43(4), 772–791.
18. Giffinger, R., & Gudrun, H. (2010). Smart cities ranking: An effective instrument for the positioning of cities? *ACE: Architecture, City and Environment*, 4(12), 7–26.
19. Girardet, H. (2015). *Creating regenerative cities*. Routledge.
20. Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., et al. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756–760.
21. Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). *From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas*. *Ambio*.
22. Hofmann, C., & Schellnhuber, H. J. (2009). Urbanization and climate change: An urgent agenda. *Renewable Energy*, 34(10), 2245–2251.
23. Holling, C. S. (2003). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23.
24. IEA (International Energy Agency). (2021). *Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA.
25. Jabareen, Y. (2006). Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts. *Journal of Planning Education and Research*, 26(1), 38–52.
26. Joss, S., Tomozeiu, D., Cowley, R., & Hee Kim, J. (2013). *Towards the resilient city: A review of definitions and assessment frameworks*. *Cities*, 35, 2–16.
27. Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (Eds.). (2017). *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas*. Springer.
28. Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., et al. (2009). Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science & Technology*, 43(19), 7297–7302.
29. Leydesdorff, L., & Deakin, M. (2011). The triple-helix model of smart cities: A neo-evolutionary perspective. *Journal of Urban Technology*, 18(2), 53–63.
30. Luederitz, C., Lang, D. J., & von Wehrden, H. (2017). A systemic review of guiding principles for sustainability transformation. *Journal of Cleaner Production*, 169, 1–15.
31. Marshall, S. (2016). *Cities design for resilience: A new paradigm of urbanism*. Routledge.
32. McPhearson, T., Andersson, E., Elmqvist, T., & Frantzeskaki, N. (2015). Resilience and ecosystem services in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 125, 1–12.
33. Metzger, J., & Decuyper, L. (2017). Infrastructural resilience: From systems engineering to equitable governance. *Urban Studies*, 54(2), 130–145.
34. Newman, P., Beatley, T., & Boyer, H. (2017). *Resilient cities: Overcoming fossil fuel dependency*. Island Press.
35. Olsson, P., Folke, C., & Berkes, F. (2004). Adaptive co-management for building resilience in social–ecological systems. *Environmental Management*, 34(1), 75–90.
36. Pelling, M. (2011). *Adaptation to climate change: From resilience to transformation*. Routledge.
37. Ranganathan, J., Raustiala, K., & Sagar, A. (2018). Distributed clean energy solutions and climate policy. *Energy Policy*, 121, 505–518.
38. Rittel, H. W. J., & Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 4(2), 155–169.
39. Rosenzweig, C., Solecki, W., Hammer, S. A., & Mehrotra, S. (Eds.). (2010). *Climate change and cities: First assessment report of the Urban Climate Change Research Network*. Cambridge University Press.
40. Satterthwaite, D. (2008). Climate change and urbanization: Effects and implications for urban governance. *Environment and Urbanization*, 20(2), 539–555.
41. Seto, K. C., Sánchez-Rodríguez, R., & Fragkias, M. (2010). The new geography of contemporary urbanization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083–16088.

42. Solecki, W., Leichenko, R., & O'Brien, K. (2011). Climate change adaptation strategies and transformation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), 168–173.
43. UN Habitat. (2020). *World Cities Report 2020: The value of sustainable urbanization*. United Nations Human Settlements Programme.
44. United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations.
45. Van Meerkerk, I., & Edelenbos, J. (2014). Networks in governance: Structure, management, and scale dynamics. *Public Management Review*, 16(1), 40–62.
46. Wheeler, S. M., & Beatley, T. (2014). *Sustainable urban development readers*. Routledge.
47. Wong, C., & Chen, X. (2015). A review of urban resilience strategies in tackling climate change. *Sustainable Cities and Society*, 14, 16–27.
48. World Bank. (2019). *Innovative urban planning and infrastructure financing*. World Bank Publications.
49. Yeh, A. G. O., & Li, X. (2017). Urban sustainability assessment methodologies and tools. *Sustainability*, 9(12), 2277.
50. Zuo, J., & Zhao, Z.-Y. (2014). Green building research — current status and future agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271–281.
51. Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 341–343.
52. Alberti, M. (2016). *Cities that think like planets: Complexity, resilience, and innovation in hybrid ecosystems*. University of Washington Press.
53. Beatley, T. (2011). *Biophilic cities: Integrating nature into urban design and planning*. Island Press.
54. Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2012). *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Island Press.
55. Berardi, U. (2015). Green roofs and sustainable urban development. *Cities and the Environment*, 8(1), 1–21.
56. Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293–301.
57. Brundtland, G. H. (Ed.). (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
58. C40 Cities. (2021). *The future of urban consumption in a 1.5°C world*. C40 Cities Climate Leadership Group.
59. Chourabi, H., Nam, T., Walker, S., Gil-Garcia, J. R., Mellouli, S., Nahon, K., Pardo, T. A., & Scholl, H. J. (2012). Understanding smart cities: An integrative framework. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2289–2297.
60. European Commission. (2021). *New European Bauhaus: Beautiful, sustainable, together*. Publications Office of the European Union.
61. European Environment Agency. (2020). *Urban sustainability in Europe—Opportunities and challenges*. European Environment Agency.
62. Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253–267.
63. Gehl, J. (2010). *Cities for people*. Island Press.
64. Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756–760.
65. Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From multifunctionality to multiple ecosystem services? *Landscape and Urban Planning*, 125, 121–129.
66. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
67. International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA Publications.
68. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 37120: Sustainable cities and communities—Indicators for city services and quality of life*. ISO.
69. Jabareen, Y. (2006). Sustainable urban forms. *Journal of Planning Education and Research*, 26(1), 38–52.
70. Kennedy, C., Cuddihy, J., & Engel-Yan, J. (2007). The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 43–59.
71. Lehmann, S. (2016). *Low carbon cities: Transforming urban systems*. Routledge.

72. Lyle, J. T. (1994). *Regenerative design for sustainable development*. John Wiley & Sons.
73. Lynch, K. (1981). *A theory of good city form*. MIT Press.
74. Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49.
75. Newman, P., & Jennings, I. (2008). *Cities as sustainable ecosystems*. Island Press.
76. Newman, P., & Kenworthy, J. (1999). *Sustainability and cities: Overcoming automobile dependence*. Island Press.
77. OECD. (2020). *Cities in the world: A new perspective on urbanisation*. OECD Publishing.
78. Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social–ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422.
79. Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L., & McGrath, B. (2013). *Resilience in ecology and urban design*. Springer.
80. Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., et al. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475.
81. Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Hammer, S. A., & Mehrotra, S. (Eds.). (2011). *Climate change and cities: First assessment report of the Urban Climate Change Research Network*. Cambridge University Press.
82. Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083–16088.
83. Sharifi, A. (2016). A critical review of selected tools for assessing community resilience. *Ecological Indicators*, 69, 629–647.
84. Sporn, A. W. (1984). *The granite garden: Urban nature and human design*. Basic Books.
85. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., et al. (2015). Planetary boundaries. *Science*, 347(6223), Article 1259855.
86. United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations.
87. United Nations Environment Programme. (2021). *Making peace with nature*. UNEP.
88. United Nations Human Settlements Programme. (2020). *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*. UN-Habitat.
89. United Nations Human Settlements Programme. (2022). *World cities report 2022: Envisaging the future of cities*. UN-Habitat.
90. United Nations Human Settlements Programme. (2024). *World cities report 2024*. UN-Habitat.
91. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030*. UNDRR.
92. World Bank. (2023). *Thriving: Making cities green, resilient, and inclusive in a changing climate*. World Bank.
93. World Economic Forum. (2023). *The global risks report 2023* (18th ed.). World Economic Forum.
94. World Green Building Council. (2019). *Bringing embodied carbon upfront*. World Green Building Council.
95. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines*. World Health Organization.
96. World Resources Institute. (2021). *Towards a more equal city: Urban planning for inclusive growth*. World Resources Institute.
97. Yeang, K. (2008). *EcoDesign: A manual for ecological design*. Wiley-Academy.
98. Yu, K. (2014). Sponge cities: Theory and practice. *Landscape Architecture Frontiers*, 2(3), 18–36.
99. Zhang, X., Shen, L., Wu, Y., & Fan, H. (2011). Green strategy for gaining competitive advantage in housing development. *Journal of Cleaner Production*, 19(2–3), 157–167.
100. Zhou, D., Zhao, S., & Liu, S. (2016). Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation and thermal environments. *Remote Sensing*, 8(12), 989.

ELEVATED SERVICE TEMPERATURE EFFECTS ON IMPACT BEHAVIOR OF RAP-SUBSTITUTED GEOPOLYMER CONCRETE

Assoc. Prof. Ali İhsan ÇELİK

Kayseri University, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Vocational School, Construction Department,
Kayseri-Türkiye

Email: acelik@kayseri.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7233-7647>

Asst. Prof. İsmail Ünsal

Adıyaman University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Adıyaman -Türkiye

Email: iunsal@adiyaman.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6324-7209>

Prof. Mehmet Fatih ŞAHAN

Adıyaman University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Adıyaman -Türkiye

Email: mfs@adiyaman.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3334-3945>

ABSTRACT

This study investigated the impact behavior of RAP-substituted geopolymer concrete under increasing service temperatures. Geopolymer concrete samples were cast utilizing a variety of mix designs that incorporated recycled asphalt pavement (RAP) aggregates as a substitute for fine aggregate. The impact behavior of the concrete products was examined at different service temperatures. Fixed ratios (2.0) of sodium silicate to sodium hydroxide solutions served as alkali activators. Fly ash (FA) and ground-granulated blast-furnace slag (GGBFS) were used as binders. The RAP substitution ratios for the mixtures were 0%, 33%, and 66%, while the GGBFS proportion to the total binder was set at 16.5%, 33%, and 66%. The study considered temperature levels of 25 °C for ambient conditions and 75 °C for elevated service temperatures. Impact tests were conducted using an instrumented drop-weight test setup. The findings indicate that the impact performance of paving stones may be significantly influenced by rising service temperatures. In many of the mixtures, the impact performance declined slightly as the ambient temperature increased. However, a 33% RAP substitution demonstrated better impact performance than the control samples under elevated temperature, making it the optimal ratio in the scope of the study. An increase in the GGBFS ratio improves impact performance at moderate ambient temperature, but this effect reverses at higher service temperature, and performance deteriorates with increasing GGBFS.

Keywords: geopolymer concrete, recycled asphalt pavement, ambient temperature, impact strength, energy dissipation.

1. Introduction

In the production of geopolymer concrete, industrial wastes such as fly ash and ground granulated blast furnace slag serve as raw materials and binders. Sodium hydroxide and sodium silicate solutions are used as alkali activators in the mixtures. This approach makes geopolymer concrete more environmentally friendly compared to traditional Portland cement concrete [1]. Additionally, literature suggests that replacing natural aggregates in these mixtures with recycled asphalt pavement (RAP) aggregates can enhance sustainability by reducing the demand for natural aggregates [2]. Studies on the use of RAP aggregates in geopolymer concrete production have evaluated their suitability for structural applications [3] and for constructing walkways or roads subjected to light traffic loads [4-7].

On the other hand, low-velocity impact tests play an important role in product development. One experimental setup used to assess a product's energy absorption performance is the instrumental drop-weight test. Ünsal [2] reported that RAP substitution slightly reduced the impact performance of geopolymer concrete samples. However, he observed that performance improved with increasing GGBFS ratio and even increased further compared to control samples. It's also important to consider the service temperatures that products may encounter in paving stones during product development. Chestovich, Saroukhanoff [8] recorded the surface temperature of road pavements under direct solar exposure in a desert climate. They reported temperature readings of 166°F (74.4°C) for asphalt and 144°F (62.2°C) for concrete surfaces. In particular, extremely high temperatures raise questions about how these conditions will affect the impact performance of pavement products. Additionally, how will the RAP substitution ratio and GGBFS ratio influence performance under elevated temperatures?

This study examines the impact behavior of RAP-substituted geopolymer concrete that incorporates GGBFS under increasing ambient temperatures. The samples underwent low-velocity impact tests at both ambient temperature and at 75°C. A comparative analysis was conducted to evaluate the maximum force and energy dissipation values recorded during the impact events.

2. Materials and Method

In the study, the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide was kept constant at 2.0 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$). The concentration of sodium hydroxide was set at 14 M. The binder used in the mixtures consisted of FA and GGBFS. The GGBFS constituted 16.5%, 33%, and 66% of the total binder. Additionally, natural fine aggregate (0-5 mm) was replaced with RAP aggregate (0-5 mm) at 0%, 33%, and 66% proportions. The composition of the mixtures is presented in Table 1. Sample R33-B66 indicates that RAP aggregates replace fine aggregates at 33%, while GGBFS, replaced by FA, is present at 66% in the total binder. A superplasticizer (SP) was utilized to reduce issues related to workability.

Table 1 Preparation of materials for the formulation of one cubic meter of concrete (kg)

Specimen	FA	GGBFS	Na_2SiO_3	NaOH	Aggregate			SP
					Fine	RAP	Coarse	
R0-B16.5	339	67	189.5	94.7	643	0	1194	7
R0-B33	272	134	189.5	94.7	643	0	1194	7
R0-B66	138	268	189.5	94.7	643	0	1194	7
R33-B16.5	339	67	189.5	94.7	431	212	1194	7
R33-B33	272	134	189.5	94.7	431	212	1194	7
R33-B66	138	268	189.5	94.7	431	212	1194	7
R66-B16.5	339	67	189.5	94.7	219	424	1194	7
R66-B33	272	134	189.5	94.7	219	424	1194	7
R66-B66	138	268	189.5	94.7	219	424	1194	7

A total of 9 mixtures were designed, with 3 identical samples prepared for each. After casting, all samples were allowed to cure at ambient temperature (~25 °C) for 28 days. For samples designated for testing at elevated temperatures, they were placed in an electric furnace at 75 °C for 24 hours after 28

days of ambient curing. They were subjected to impact testing immediately, without cooling. Disk samples for the impact tests were prepared with a diameter of 100 mm and a thickness of 40 mm. The dynamic tests were conducted using an instrumented drop-weight test setup, as originally recommended by ACI-544.2R [9], to evaluate the impact properties of fiber reinforced concrete samples. In this method, the force applied to the sample during an impact event is recorded in the time domain using a load cell. The energy dissipation value corresponding to the recorded maximum force is then calculated analytically [1].

3. Results and Discussion

The impact force values obtained from impact tests performed on nine distinct mixtures at ambient temperature and elevated service temperature are shown in Figure 1. Each graph represents the average of three identical samples from each mixture. The findings demonstrate that an increase in ambient temperature is associated with a reduction in the maximum force the samples can bear. Additionally, Figure 2 presents the energy dissipation values corresponding to the maximum force. Figure 3 has been prepared to facilitate a more detailed analysis of the maximum force values.

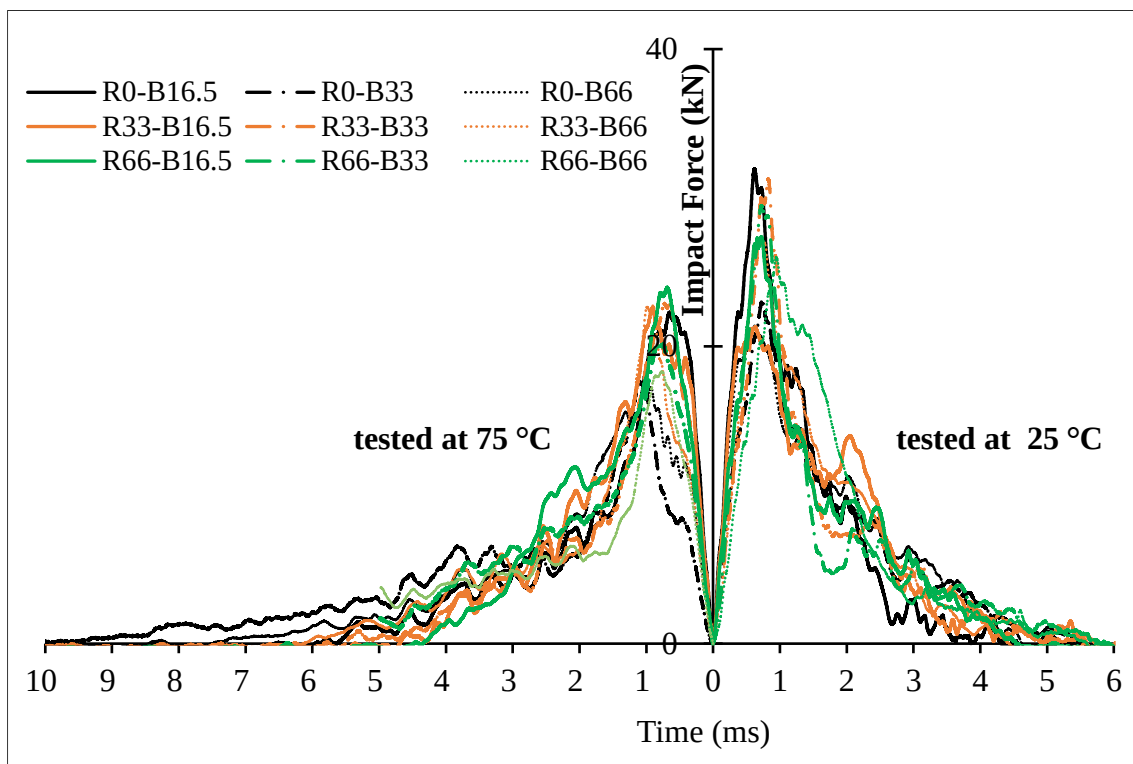


Figure 1. Time history of impact force recorded during impact events

According to test results conducted at ambient temperature (Fig. 2), the addition of RAP aggregate reduced the energy dissipation of geopolymer concrete having a low GGBFS content (16.5%). With a high GGBFS content, this negative effect was tolerated, and even higher energy dissipation was observed compared to mixtures without RAP. Similar findings were discussed in detail in a previous study [2].

This situation changed at an ambient temperature of 75 °C. The addition of 33% RAP aggregate increased energy dissipation compared to control (RAP-0% at 75 °C) samples. The increases in energy dissipation were 26.8%, 14.79%, and 14.77% for GGBFS ratios of 16.5%, 33.0%, and 66.0%, respectively. Conversely, the addition of 66% RAP resulted in decreased energy dissipation when compared to the control mixtures, with decreases of 4.3%, 0.2%, and 19.9% for the 16.5%, 33.0%, and 66.0% GGBFS rates, respectively.

At 25 °C, an increase in GGBFS led to a consistent increase in energy dissipation. Conversely, at 75 °C, an increase in GGBFS led to a steady decline in energy dissipation.

It can be stated that an increase in ambient temperature generally reduces the energy dissipation potential of various mixtures. However, significant increases are observed specifically in mixtures with a 33% RAP substitution.

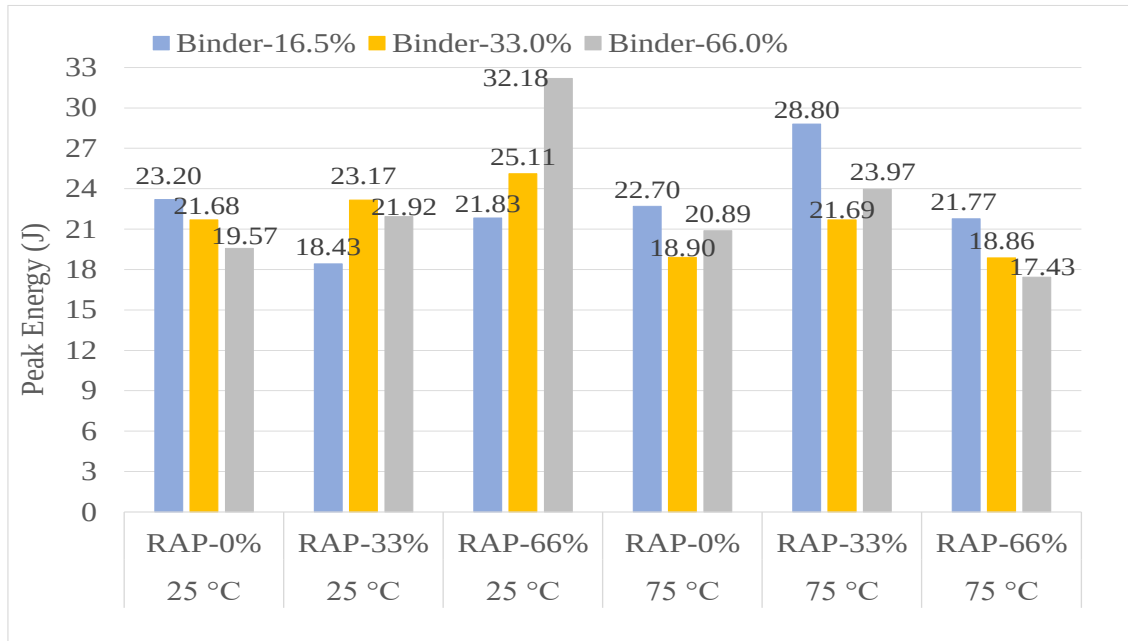


Figure 2. Peak energy

Rising ambient temperatures caused a significant reduction in peak force values (Fig 3). Although incorporating GGBFS into RAP substituted geopolymer concrete showed a slight improvement at an ambient temperature of 25 °C, it caused a consistent decline at higher temperatures (75 °C), which was similar to the observed trends in energy dissipation. Notably, a 33% RAP content resulted in an increase in peak force at elevated temperatures.

Figure 4 presents images of the samples after impact testing at 25°C and 75 °C. Severe damage is observed in the control samples, which do not incorporate RAP aggregate. The severity of damage diminishes slightly with the inclusion of RAP, with a more pronounced effect noted in mixtures containing 66% RAP. The damage conditions recorded for both temperature groups exhibit similar characteristics.

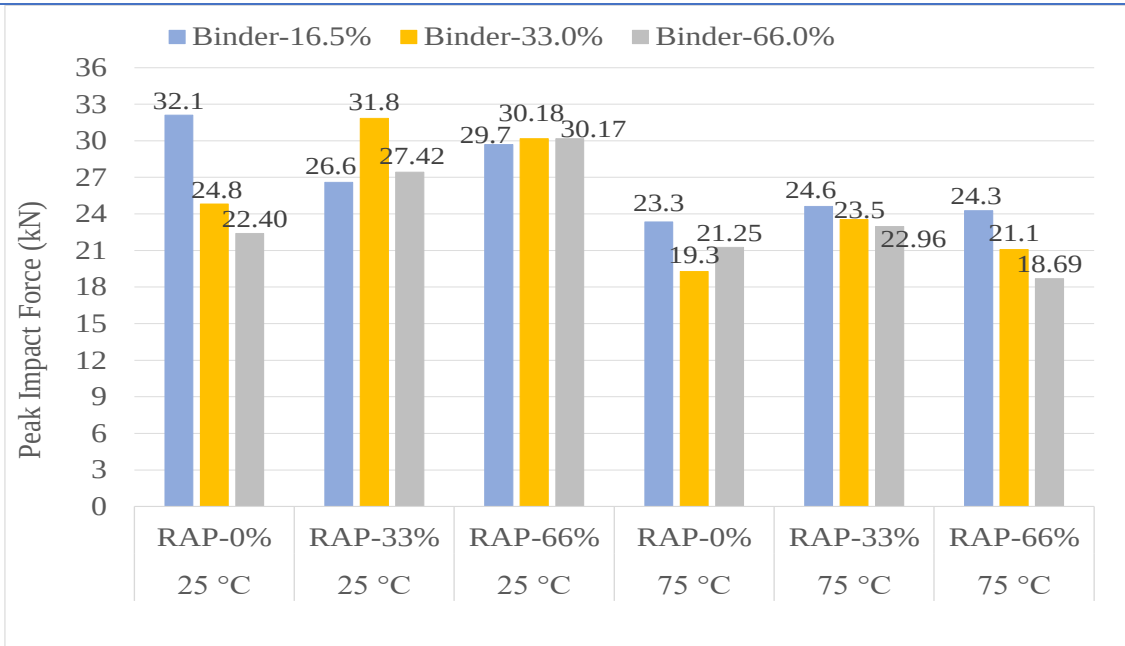
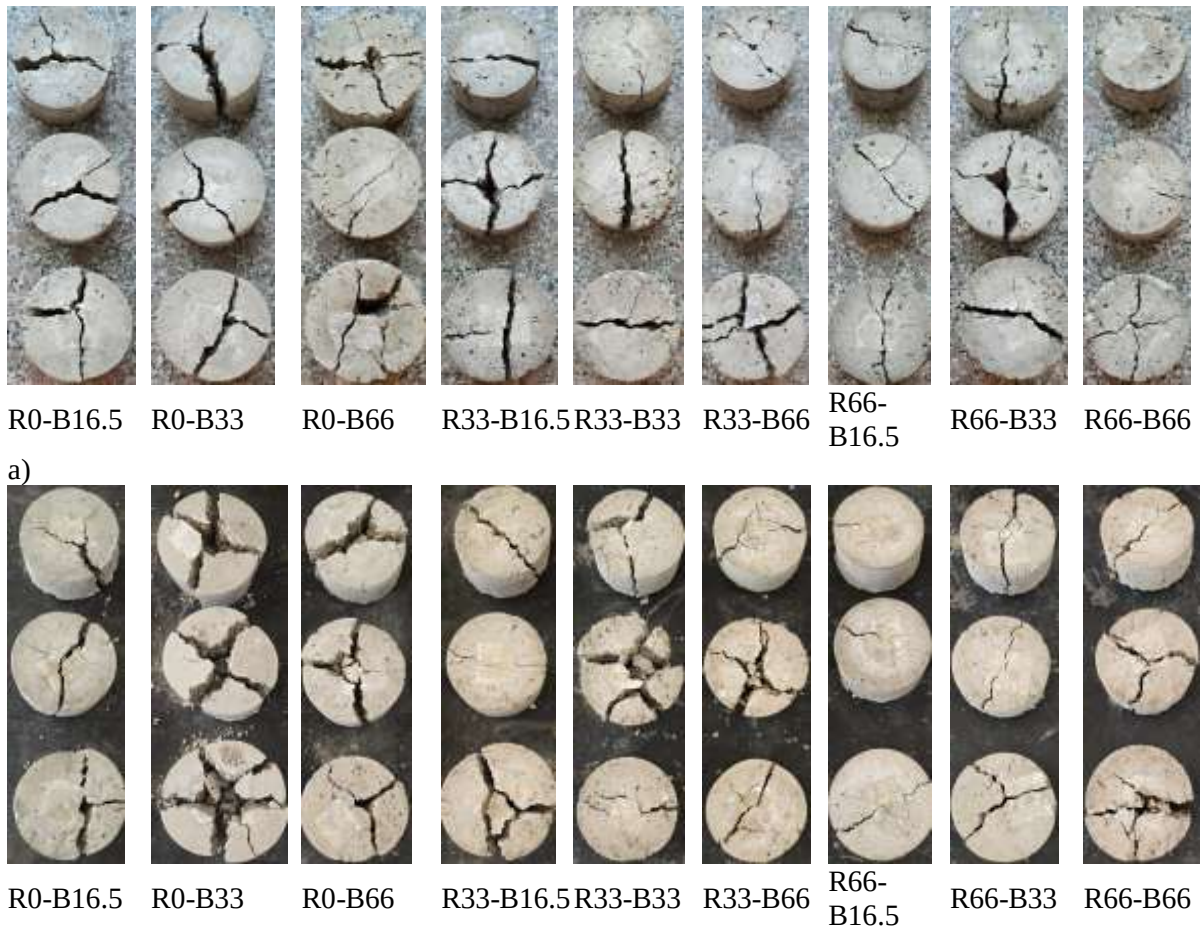


Figure 3. Peak force



b)
Figure 4. Failure mode a) samples tested at 25 °C b) samples tested at 75 °C

4. Conclusion

In this study, it was found that while elevated ambient temperatures slightly reduced the energy dissipation properties of the mixtures, a 33% substitution of RAP aggregate resulted in higher energy

dissipation and peak force values than the control samples. Therefore, under high service temperatures, a 33% RAP substitution is considered the optimal ratio in the scope of the study for achieving the best impact performance. Furthermore, a higher amount of GGBFS improves energy dissipation of RAP-substituted geopolymer concrete at normal ambient temperatures. This improvement ranges from 18% to 48%, depending on the GGBFS ratio used. However, this higher amount of GGBFS reduces the energy dissipation at high service temperatures, with reductions ranging from 13% to 25% depending on the GGBFS ratios.

Further research is recommended to expand on these findings, including detailed scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy analyses to understand the underlying mechanisms better.

References

- [1] Çelik Aİ, Tunç U, Altın M, Ünsal İ, Özkılıç YO. Impact performance and microstructural behavior of lightweight geopolymer concrete with waste vermiculite and red pumice aggregates. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2026;144:104408.
- [2] Ünsal, İ. An experimental study on the impact behavior of geopolymer concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate. *Sci Rep* 16, 21006 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-53683-1>
- [3] Ghosh A, Ransinchung G, Kumar P, Zaw CHH. Effect of particle size and proportion of RAP aggregates on the strength durability and microstructure of ambient cured geopolymer concrete mixes. *Constr Build Mater*. 2024;455:139164.
- [4] Debbarma S, Selvam M, Singh S. Can flexible pavements' waste (RAP) be utilized in cement concrete pavements? – A critical review. *Constr Build Mater*. 2020;259:120417.
- [5] Benli A, Öz A, Kılıç D, Tortum A, Yıldız İ, Kaplan G. Sustainable fly ash-based geopolymer composites: The influence of RAP aggregates and silica fume on strength, durability, and microstructural properties. *Struct Concr*. 2026;27:966-97.
- [6] Ghosh A, Ransinchung GDRN, Kumar P. Assessing the Viability of Industrial Waste Recycling in RAP-Incorporated Geopolymer Concrete Pavements: An Investigation into Performance Correlations. *Arabian J Sci Eng*. 2024;49:6089-105.
- [7] Rahman SS, Khattak MJ. Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement Geopolymer Concrete as a Pavement Construction Material. *Int J Pavement Res Technol*. 2023;16:888-907.
- [8] Chestovich PJ, Saroukhanoff RZ, Moujaes SF, Flores CE, Carroll JT, Saquib SF. Temperature Profiles of Sunlight-Exposed Surfaces in a Desert Climate: Determining the Risk for Pavement Burns. *Journal of Burn Care & Research*. 2023;44:438-45.
- [9] ACI-544.2R. ACI 544.2R Measurement of properties of fiber reinforced concrete. 1999.

IN SILICO INVESTIGATION OF THE INHIBITORY ACTIVITIES OF BENZOFURAN-BASED HETEROCYCLIC HYBRID COMPOUNDS AGAINST CHOLINESTERASE ENZYMES INVOLVED IN ALZHEIMER'S DISEASE

Azra Kiyak

Hatay Mustafa Kemal University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, Hatay,
Türkiye

Email: 2291112801@ogr.mku.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-3583-6172>

Doç. Dr. Neslihan Beyazit

Hatay Mustafa Kemal University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, Hatay,
Türkiye

Email: nbeyazit@mkcu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5722-2400>

Abstract

Alzheimer's disease (AD) is a progressive neurodegenerative disorder characterized by impaired cholinergic transmission and reduced acetylcholine (ACh) levels. A widely used therapeutic strategy is to raise synaptic ACh by inhibiting acetylcholinesterase (AChE) and butyrylcholinesterase (BChE). In this study, the binding tendencies of 30 benzofuran-based hybrid compounds toward these two enzymes were evaluated by *in silico* molecular docking, and their drug-likeness and ADME properties were calculated. The compounds share a common architecture: a methoxy-substituted benzofuran at one end, one of three central scaffolds (chalcone, aromatic isoxazole, or aromatic pyrimidinone), and one of five heterocyclic amines at the other end. Docking was performed with AutoDock Vina 1.2.7 against AChE (PDB: 4EY7) and BChE (PDB: 4BDS); the protocol was validated by successful redocking of the co-crystal ligands. ADME descriptors were computed with RDKit, and blood–brain barrier (BBB) penetration was predicted with the BOILED-Egg model. The results show that binding in both enzymes is predominantly driven by benzofuran-centered aromatic stacking (Trp86/Trp82), whereas the canonical cation– π interaction remains secondary, contrary to expectation. The pyrimidinone scaffold provided the strongest BChE binding but showed weakened BBB penetration due to its high polar surface area. When binding, BBB penetration, and drug-likeness are considered together, the dimethoxy-isoxazole-piperazine derivative (2ad) emerges as the most balanced dual-target candidate, while the dimethoxy-pyrimidinone-cyclohexylpiperazine derivative (3ac) is the highest-affinity compound. The findings indicate that benzofuran-based hybrids are promising multi-target AD candidates and provide a rational prioritization for subsequent synthesis and biological validation.

Keywords: Alzheimer's disease, acetylcholinesterase, butyrylcholinesterase, molecular docking, benzofuran, ADME

1. Introduction

Alzheimer's disease (AD) is a progressive neurodegenerative disorder and the most common cause of dementia. Its neuropathology is defined mainly by extracellular amyloid- β (A β) plaques and intracellular neurofibrillary tangles of hyperphosphorylated tau, but synaptic dysfunction, oxidative stress, neuroinflammation, and the degeneration of several neurotransmitter systems also drive its clinical progression (Scheltens et al., 2021). Among these changes, the loss of basal forebrain cholinergic projections is one of the best-characterized. The cholinergic hypothesis holds that reduced acetylcholine (ACh) signaling contributes substantially to deficits in attention, learning, and memory, although it does not fully explain the disease (Francis et al., 1999; Hampel et al., 2018).

An established symptomatic strategy is to raise synaptic ACh by inhibiting the cholinesterases that hydrolyze it. Acetylcholinesterase (AChE) is the predominant ACh-hydrolyzing enzyme in the healthy brain, whereas butyrylcholinesterase (BChE) contributes less. As AD progresses, AChE activity declines in several affected regions while BChE activity is preserved or increases, so the relative contribution of BChE becomes more prominent in later stages (Greig et al., 2002; Nordberg et al., 2013). This shift provides a rationale for dual AChE/BChE inhibitors, although it does not by itself establish that dual inhibition is clinically superior. Rivastigmine, used in clinical practice, inhibits both enzymes (Kandiah et al., 2017).

Cholinesterase inhibitors offer modest symptomatic benefit but do not halt neurodegeneration. Anti-A β antibodies such as lecanemab and donanemab slow cognitive decline significantly but modestly in early AD, and their benefits must be weighed against restricted eligibility, monitoring demands, and adverse-event risks (Sims et al., 2023; van Dyck et al., 2023). No available treatment stops or reverses the disease. This has encouraged multi-target-directed ligands (MTDLs), single molecules designed to act on two or more relevant targets (Cavalli et al., 2008).

Chalcones, in which two aromatic rings are linked by an α,β -unsaturated carbonyl, are versatile scaffolds in medicinal chemistry: they are easy to synthesize and readily modified (Zhuang et al., 2017). Many chalcone derivatives inhibit AChE and/or BChE and show antioxidant, anti-inflammatory, neuroprotective, metal-chelating, and anti-A β aggregation activities, making them attractive starting points for AD-directed MTDLs (Thapa et al., 2021).

The benzofuran ring is likewise a medically relevant scaffold found in compounds that target cholinesterases, A β aggregation, and oxidative stress (Cabrera-Pardo et al., 2020). The natural furochromones khellin and visnagin, isolated mainly from *Ammi visnaga* L., are especially useful here: alkaline hydrolysis converts them into the acetylbenzofurans khellinone and visnaginone, which carry an acetophenone-like unit and therefore serve as precursors for benzofuran-containing chalcones via Claisen–Schmidt condensation (Abu-Hashem, 2018; Beyazit, 2018). Building on this, Sashidhara et al. reported benzofuran–chalcone hybrids that inhibited cholinesterase activity, reduced A β aggregation, and raised ACh levels in a transgenic *Caenorhabditis elegans* model — preclinical proof of concept that this combination can address cholinergic and amyloid pathology at once (Sashidhara et al., 2014).

On this basis, we designed 30 hybrid compounds built on a khellinone- and visnaginone-derived benzofuran core carrying a terminal tertiary amine, in which the central chalcone bridge was also converted into aromatic isoxazole and pyrimidinone rings. As a first evaluation of their potential as dual AChE/BChE-directed MTDLs, we examined their binding to AChE (PDB: 4EY7) and BChE (PDB: 4BDS) by molecular docking and predicted their drug-likeness and ADME properties with RDKit, aiming to prioritize the most promising candidates before synthesis.

2. Materials and Methods

2.1. Compound library and ligand preparation

The 30 compounds studied share a common architecture: a methoxy-substituted (dimethoxy or trimethoxy) benzofuran at one end, one of three scaffolds (chalcone, aromatic isoxazole, or aromatic pyrimidinone) in the center, and one of five heterocyclic amines at the other end. The compounds arise from the combination of three scaffolds $\times$ two benzofuran methoxylation patterns $\times$ five amines (Figure 1). The basicity of the terminal amine is a critical distinction: in the cyclohexylpiperazine and piperazine derivatives (c, d), the terminal aliphatic amine is protonated at pH 7.4, forming a cationic center; in the morpholine, piperidine, and pyrrolidine derivatives (e, f, g), the nitrogen is bonded directly to the aromatic ring, so its basicity is low and it remains neutral at this pH. Ligand structures were built in

Avogadro 1.2.0, protonated at pH 7.4, energy-minimized with the MMFF94 force field, and converted to docking format (PDBQT) with Meeko (Hanwell et al., 2012).

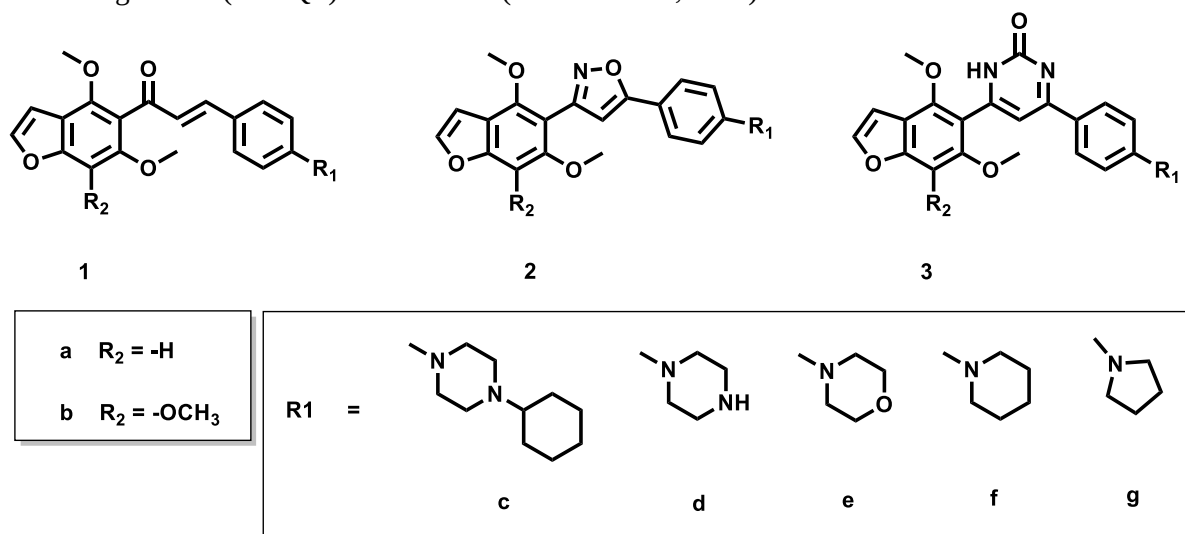


Figure 1. General structures of the designed compound library: three scaffolds (1 chalcone, 2 aromatic isoxazole, 3 aromatic pyrimidinone) × two benzofuran methoxylation patterns (R₂: a dimethoxy, b trimethoxy) × five terminal amines (R₁: c cyclohexylpiperazine, d piperazine, e morpholine, f piperidine, g pyrrolidine) = 30 hybrid compounds.

2.2. Protein preparation

The co-crystal structure of human AChE with donepezil (PDB: 4EY7; (Cheung et al., 2012)) and that of human BChE with tacrine (PDB: 4BDS; (Nachon et al., 2013)) were used as targets. Chain A of each structure was retained; water molecules, ions, and the co-crystal ligand were removed, polar hydrogens and charges were assigned, and the structure was converted to docking format with Meeko.

2.3. Molecular docking and protocol validation

Docking calculations were performed with AutoDock Vina 1.2.7 (exhaustiveness 16, num_modes 20) (Eberhardt et al., 2021; Trott & Olson, 2010). Search boxes were centered on the co-crystal ligand so as to encompass the binding gorge of each enzyme. The reliability of the protocol was validated by re-docking the co-crystal ligands: the experimental pose was removed and re-docked, and the root-mean-square deviation (RMSD) between the best obtained pose and the experimental pose was calculated. Donepezil was reproduced with an RMSD of 0.68 Å for AChE and tacrine with an RMSD of 0.21 Å for BChE; as both values are below the 2 Å threshold, the protocols were considered reliable (Kontoyianni et al., 2004).

2.4. Interaction analysis

The best poses were selected and visualized with PyMOL 3.1.0 and Maestro 14.7, and their interactions were examined. π -stacking was assessed by a center-to-center distance of ~3.5–4.5 Å between aromatic rings; cation- π by the face-on approach of the protonated amine to an aromatic ring; and hydrogen bonding by both an appropriate distance and an appropriate donor-acceptor angle. It was taken into account that the scoring function of AutoDock Vina represents cation- π and electrostatic/hydrogen-bond contributions only to a limited extent (Quiroga & Villarreal, 2016).

2.5. ADME and drug-likeness calculations

Physicochemical descriptors (molecular weight, WLOGP lipophilicity, TPSA topological polar surface area, hydrogen-bond donor/acceptor counts, number of rotatable bonds), drug-likeness rules (Lipinski's rule of five and the Veber criteria), the QED drug-likeness score, the synthetic accessibility (SA) score, PAINS/Brenk structural alerts, and BBB prediction with BOILED-Egg were computed using RDKit (Bickerton et al., 2012; Daina et al., 2017; Daina & Zoete, 2016; Lipinski et al., 1997; Veber et al., 2002). Because ADME descriptors are target-independent, protonatable compounds were converted to their neutral forms at this stage in accordance with standard convention.

3. Findings and Discussion

3.1. Protocol validation

In the redocking test, the experimental binding poses of the co-crystal ligands were successfully reproduced (AChE/donepezil 0.68 Å; BChE/tacrine 0.21 Å). These low RMSD values show that the docking protocol correctly predicts the experimental binding mode and that the subsequent score and pose analyses rest on a reliable basis (Figure 2).

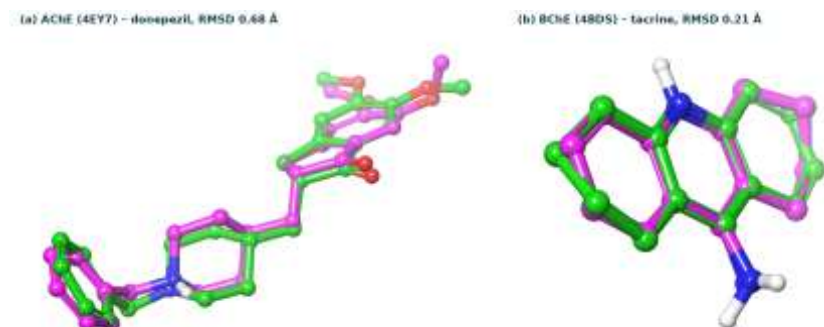


Figure 2. Validation of the docking protocol by re-docking of the co-crystal ligands. The experimental (crystallographic) pose is shown in green and the re-docked pose in magenta: (a) donepezil in AChE (4EY7), RMSD 0.68 Å; (b) tacrine in BChE (4BDS), RMSD 0.21 Å.

3.2. Binding to AChE and BChE

The active site of AChE is a narrow gorge approximately 20 Å deep from the enzyme surface; at the base lie the anionic site (Trp86) and the Ser203–His447–Glu334 catalytic triad, and at the mouth the peripheral anionic site (PAS; Trp286, Tyr72, Tyr124, Tyr341) (Figure 3a). The best docking scores clustered in a narrow band, approximately between -10.3 and -12.3 kcal/mol (Table 1). Similar to the reference drug donepezil, the compounds bridge the gorge with their aromatic rings at both ends; the benzofuran core mostly performs π -stacking with Trp86 and the central aromatic ring with Tyr341/Trp286. A notable finding is that the canonical cation– π interaction expected between the protonatable amines and Trp86 is not the primary anchor in most compounds but remains secondary; the clearest example of cation– π was the trimethoxy-isoxazole-piperazine derivative (2bd).

The BChE gorge has a wider acyl pocket and a less aromatic mouth than that of AChE; at the base lie Trp82 and the Ser198–His438–Glu325 catalytic triad (Figure 3b). The compounds exhibited two energetically almost equivalent binding modes (benzofuran-deep and cation-deep) differing by only ~ 0.3 – 0.8 kcal/mol. The scaffold was the strongest determinant of predicted affinity in BChE: the mean of the best scores followed the order pyrimidinone (~ -10.1) > chalcone (~ -9.5) > isoxazole (~ -9.1), and the strongest binders clustered in the pyrimidinone series (Table 1). The terminal amine created a trade-off: the bulky cyclohexylpiperazine gave the best raw scores but, owing to its bulk, could not deliver its cationic nitrogen to His438; in contrast, the smaller piperazine was able to form a directional interaction with His438.

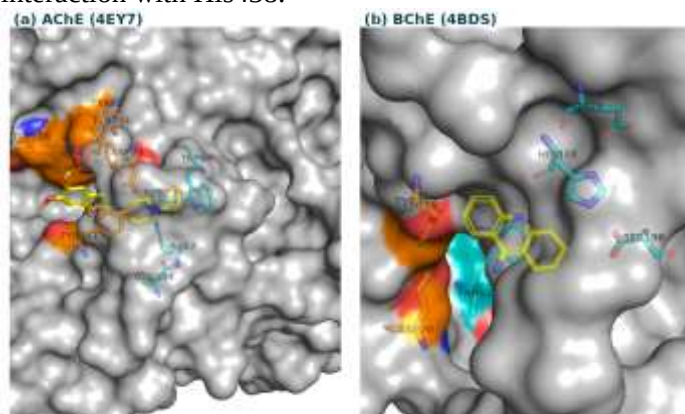


Figure 3. The active-site gorge of the target enzymes: (a) AChE (4EY7, donepezil), (b) BChE (4BDS, tacrine). The catalytic base region (teal) and the peripheral mouth region (orange) are shown.

3.3 Comparison of the Two Enzymes

The conserved pattern is that, in both enzymes, binding is predominantly governed by benzofuran-centered aromatic stacking (Trp86/Trp82) and the canonical cation- π remains secondary. The divergent pattern arises directly from differences in pocket architecture: the wider acyl pocket of BChE accommodates bulkier groups, while the reduced aromaticity of its PAS weakens some aromatic contacts in BChE that are possible in AChE. The compound with the highest dual-target affinity was the dimethoxy-pyrimidinone-cyclohexylpiperazine derivative (3ac) (AChE -12.3; BChE -11.16 kcal/mol; Figure 4).

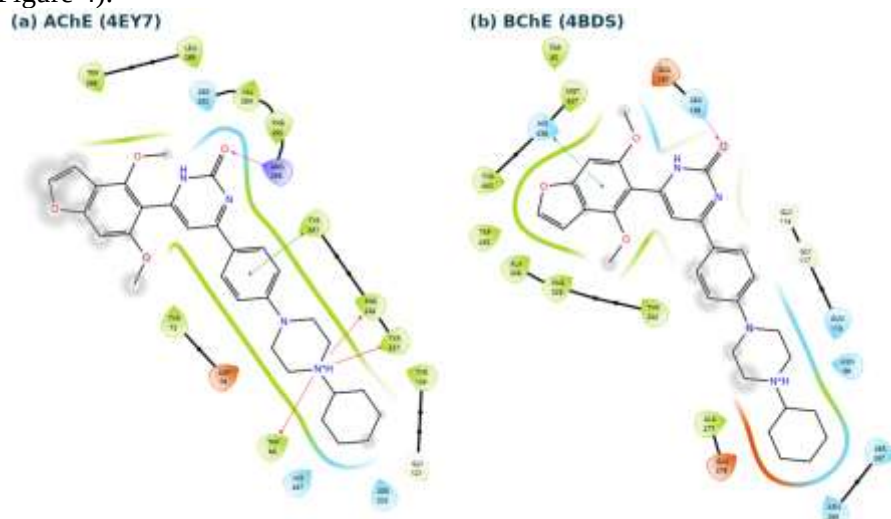


Figure 4. Two-dimensional interaction maps of compound 3ac, the derivative with the highest dual-target affinity: (a) AChE (4EY7), (b) BChE (4BDS). Green lines denote π - π stacking, red lines cation- π interactions, and purple arrows hydrogen bonds. The hydrogen bond formed by the pyrimidinone carbonyl is a motif common to both targets.

3.4. ADME and drug-likeness

All compounds were found to be readily synthesizable (SA score 2.4–3.0) and to satisfy the Veber criteria. Lipinski violations were seen mainly in the most lipophilic compounds (bulky cyclohexylpiperazine and trimethoxy combinations). In the structural-alert screening, only the chalcones received a Michael-acceptor (PAINS) flag; the isoxazole and pyrimidinone derivatives were clean. Regarding the blood-brain barrier, the pyrimidinones were predicted to be BBB-negative in the BOILED-Egg model owing to their high TPSA, whereas the chalcone and isoxazole derivatives were more prone to BBB penetration (Figure 5).

A clear trade-off was observed between binding strength and BBB penetration; while the highest-affinity pyrimidinones remained disadvantaged in terms of BBB penetration, the dimethoxy-isoxazole-piperazine derivative (2ad) stood out as the most balanced candidate, with strong binding, BBB positivity, zero Lipinski violations, and a high QED (0.53). The docking scores and selected ADME descriptors of all compounds are presented in Table 1.

Table 1. Docking scores (kcal/mol) of the compounds against AChE and BChE and selected ADME descriptors. Scores in kcal/mol; MW in g/mol; Viol. = number of Lipinski violations; BBB: + penetrant / – non-penetrant. Highlighted rows indicate the leads (2ad, 3ac).

Code	AChE	BChE	MW	WLOGP	TPSA	QED	SA	Viol.	BBB
1ac	-11.49	-9.62	474.6	5.80	55.2	0.32	2.63	1	+
1ad	-11.99	-9.62	392.5	3.76	63.9	0.51	2.57	0	+
1ae	-11.80	-9.49	393.4	4.18	61.1	0.46	2.49	0	+
1af	-12.12	-9.64	391.5	5.34	51.9	0.42	2.44	1	+
1ag	-11.36	-9.24	377.4	4.95	51.9	0.45	2.43	0	+
1bc	-10.90	-9.98	504.6	5.81	64.4	0.28	2.77	2	+
1bd	-11.88	-9.22	422.5	3.76	73.2	0.46	2.72	0	+
1be	-11.76	-9.28	423.5	4.19	70.4	0.42	2.64	0	+
1bf	-11.93	-9.36	421.5	5.35	61.1	0.38	2.59	1	+
1bg	-11.74	-9.24	407.5	4.95	61.1	0.41	2.59	0	+
2ac	-11.89	-8.83	487.6	6.23	64.1	0.32	2.72	1	–
2ad	-11.24	-9.07	405.5	4.18	72.9	0.53	2.67	0	+
2ae	-11.30	-9.24	406.4	4.61	70.1	0.48	2.59	0	+
2af	-11.49	-9.24	404.5	5.76	60.9	0.42	2.54	1	+
2ag	-11.36	-8.92	390.4	5.37	60.9	0.46	2.53	1	+
2bc	-10.69	-8.92	517.6	6.24	73.3	0.29	2.85	2	–
2bd	-11.16	-9.23	435.5	4.19	82.1	0.48	2.80	0	–
2be	-10.97	-9.21	436.5	4.62	79.3	0.43	2.73	0	–
2bf	-11.59	-9.28	434.5	5.77	70.1	0.38	2.68	1	+
2bg	-10.83	-8.98	420.5	5.38	70.1	0.41	2.68	1	+
3ac	-12.30	-11.16	514.6	5.32	83.8	0.37	2.86	2	–
3ad	-10.45	-10.18	432.5	3.28	92.6	0.50	2.80	0	–
3ae	-10.39	-9.91	433.5	3.70	89.8	0.51	2.73	0	–
3af	-10.57	-10.23	431.5	4.86	80.6	0.49	2.68	0	–
3ag	-10.96	-10.14	417.5	4.47	80.6	0.52	2.68	0	–
3bc	-12.05	-10.59	544.7	5.33	93.1	0.33	2.97	2	–
3bd	-10.26	-9.97	462.5	3.29	101.9	0.45	2.92	0	–
3be	-10.28	-9.56	463.5	3.71	99.1	0.46	2.85	0	–
3bf	-10.43	-9.62	461.5	4.87	89.8	0.44	2.81	0	–
3bg	-10.54	-9.59	447.5	4.48	89.8	0.47	2.80	0	–

Code: scaffold (1 chalcone · 2 isoxazole · 3 pyrimidinone) + benzofuran (a dimethoxy · b trimethoxy) + amine (c–g). Only chalcone derivatives carry a PAINS/Michael-acceptor alert.

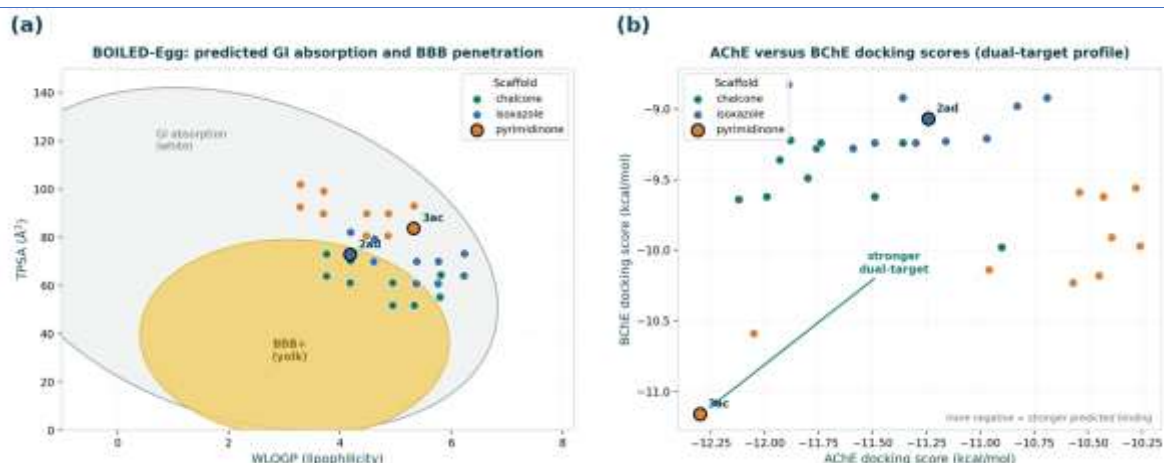


Figure 5. (a) BOILED-Egg diagram (WLOGP–TPSA): the yellow region indicates BBB+, the white region gastrointestinal absorption. (b) Scatter of AChE versus BChE docking scores. The leads 2ad and 3ac are marked.

3.5. Limitations of the method

These results are of a prioritization (pre-screening) nature. The scoring function of AutoDock Vina is approximate; the values it provides are not absolute binding energies but a relative ranking, and differences of ~1 kcal/mol may lie within the noise band. Moreover, because the scoring function represents cation– π and hydrogen-bond contributions only to a limited extent, the true contribution of poses involving these interactions may appear lower than it is. Protein flexibility, solvent effects, and protonation state are also not fully represented. Therefore, the results were interpreted by evaluating small score differences together with geometry and ADME data; final validation requires synthesis, *in vitro* inhibition assays, and molecular dynamics/MM-GBSA analyses.

4. Conclusion and Recommendations

These benzofuran-based compounds bind to both the AChE and BChE gorges predominantly through benzofuran-centered aromatic stacking (Trp86/Trp82); contrary to expectation, the canonical cation– π remains secondary in both enzymes. The scaffold that most strongly determined predicted affinity in BChE was pyrimidinone, but the high polar surface area of this scaffold weakened BBB penetration. When docking, BBB penetration, and drug-likeness are considered together, the dimethoxy-isoxazole-piperazine derivative (2ad) stands out as the most balanced dual-target candidate, while the dimethoxy-pyrimidinone-cyclohexylpiperazine derivative (3ac) stands out as the highest-affinity structural lead. That the scaffold giving the highest affinity is not the same as the most developable candidate underscores the trade-off between affinity and brain penetration.

As next steps, the synthesis of the priority candidates, *in vitro* AChE/BChE inhibition assays, and validation of binding stability by molecular dynamics and MM-GBSA studies are recommended. In addition, bioisosteric modifications that reduce the polar surface area (for example, removal of a ring nitrogen) may be considered to improve the BBB penetration of the pyrimidinone leads.

Thanks and Information Note

The authors thank the Department of Chemistry, Hatay Mustafa Kemal University, for its contributions to the conduct of this study. The authors declare no conflict of interest.

References

- Abu-Hashem, A. A. (2018). Synthesis of New Furothiazolo Pyrimido Quinazolinones from Visnagenone or Khellinone and Antimicrobial Activity. *Molecules*, 23(11), 2793. <https://doi.org/10.3390/molecules23112793>
- Beyazıt, N. (2018). The Synthesis and Spectral Properties of Benzofuran Derivative Bis-Chalcone. *Hittite Journal of Science & Engineering*. <https://doi.org/10.17350/HJSE19030000067>
- Bickerton, G. R., Paolini, G. V., Besnard, J., Muresan, S., & Hopkins, A. L. (2012). Quantifying the chemical beauty of drugs. *Nature Chemistry*, 4(2), 90–98. <https://doi.org/10.1038/nchem.1243>
- Cabrera-Pardo, J. R., Fuentealba, J., Gavilán, J., Cajas, D., Becerra, J., & Napiórkowska, M. (2020). Exploring the Multi-Target Neuroprotective Chemical Space of Benzofuran Scaffolds: A New

- Strategy in Drug Development for Alzheimer's Disease. *Frontiers in Pharmacology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.01679>
- Cavalli, A., Bolognesi, M. L., Minarini, A., Rosini, M., Tumiatti, V., Recanatini, M., & Melchiorre, C. (2008). Multi-target-Directed Ligands To Combat Neurodegenerative Diseases. *Journal of Medicinal Chemistry*, 51(3), 347–372. <https://doi.org/10.1021/jm7009364>
- Cheung, J., Rudolph, M. J., Burshteyn, F., Cassidy, M. S., Gary, E. N., Love, J., Franklin, M. C., & Height, J. J. (2012). Structures of Human Acetylcholinesterase in Complex with Pharmacologically Important Ligands. *Journal of Medicinal Chemistry*, 55(22), 10282–10286. <https://doi.org/10.1021/jm300871x>
- Daina, A., Michielin, O., & Zoete, V. (2017). SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Scientific Reports*, 7(1), 42717. <https://doi.org/10.1038/srep42717>
- Daina, A., & Zoete, V. (2016). A BOILED-Egg To Predict Gastrointestinal Absorption and Brain Penetration of Small Molecules. *ChemMedChem*, 11(11), 1117–1121. <https://doi.org/10.1002/cmdc.201600182>
- Eberhardt, J., Santos-Martins, D., Tillack, A. F., & Forli, S. (2021). AutoDock Vina 1.2.0: New Docking Methods, Expanded Force Field, and Python Bindings. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 61(8), 3891–3898. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c00203>
- Francis, P. T., Palmer, A. M., Snape, M., & Wilcock, G. K. (1999). The cholinergic hypothesis of Alzheimer's disease: a review of progress. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 66(2), 137–147. <https://doi.org/10.1136/jnnp.66.2.137>
- Greig, N. H., Lahiri, D. K., & Kumar, S. (2002). Butyrylcholinesterase: An Important New Target in Alzheimer's Disease Therapy. *International Psychogeriatrics*, 14, 77–91. <https://doi.org/10.1017/S1041610203008676>
- Hampel, H., Mesulam, M.-M., Cuello, A. C., Farlow, M. R., Giacobini, E., Grossberg, G. T., Khachaturian, A. S., Vergallo, A., Cavado, E., Snyder, P. J., & Khachaturian, Z. S. (2018). The cholinergic system in the pathophysiology and treatment of Alzheimer's disease. *Brain*, 141(7), 1917–1933. <https://doi.org/10.1093/brain/awy132>
- Hanwell, M. D., Curtis, D. E., Lonie, D. C., Vandermeersch, T., Zurek, E., & Hutchison, G. R. (2012). Avogadro: an advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform. *Journal of Cheminformatics*, 4(1), 17. <https://doi.org/10.1186/1758-2946-4-17>
- Kandiah, N., Pai, M.-C., Senanarong, V., Looi, I., Ampil, E., Park, K. W., Karanam, A. K., & Christopher, S. (2017). Rivastigmine: the advantages of dual inhibition of acetylcholinesterase and butyrylcholinesterase and its role in subcortical vascular dementia and Parkinson's disease dementia. *Clinical Interventions in Aging*, Volume 12, 697–707. <https://doi.org/10.2147/CIA.S129145>
- Kontoyianni, M., McClellan, L. M., & Sokol, G. S. (2004). Evaluation of Docking Performance: Comparative Data on Docking Algorithms. *Journal of Medicinal Chemistry*, 47(3), 558–565. <https://doi.org/10.1021/jm0302997>
- Lipinski, C. A., Lombardo, F., Dominy, B. W., & Feeney, P. J. (1997). Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 23(1–3), 3–25. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(96\)00423-1](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(96)00423-1)
- Nachon, F., Carletti, E., Ronco, C., Trovaslet, M., Nicolet, Y., Jean, L., & Renard, P.-Y. (2013). Crystal structures of human cholinesterases in complex with huprine W and tacrine: elements of specificity for anti-Alzheimer's drugs targeting acetyl- and butyryl-cholinesterase. *Biochemical Journal*, 453(3), 393–399. <https://doi.org/10.1042/BJ20130013>
- Nordberg, A., Ballard, C., Bullock, R., Darreh-Shori, T., & Somogyi, M. (2013). A Review of Butyrylcholinesterase as a Therapeutic Target in the Treatment of Alzheimer's Disease. *The Primary Care Companion For CNS Disorders*, 15(2). <https://doi.org/10.4088/PCC.12r01412>
- Quiroga, R., & Villarreal, M. A. (2016). Vinardo: A Scoring Function Based on Autodock Vina Improves Scoring, Docking, and Virtual Screening. *PLOS ONE*, 11(5), e0155183. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155183>

- Sashidhara, K. V., Modukuri, R. K., Jadiya, P., Dodda, R. P., Kumar, M., Sridhar, B., Kumar, V., Haque, R., Siddiqi, M. I., & Nazir, A. (2014). Benzofuran–Chalcone Hybrids as Potential Multifunctional Agents against Alzheimer’s Disease: Synthesis and in vivo Studies with Transgenic *Caenorhabditis elegans*. *ChemMedChem*, 9(12), 2671–2684. <https://doi.org/10.1002/cmdc.201402291>
- Scheltens, P., De Strooper, B., Kivipelto, M., Holstege, H., Ch  telat, G., Teunissen, C. E., Cummings, J., & van der Flier, W. M. (2021). Alzheimer’s disease. *The Lancet*, 397(10284), 1577–1590. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32205-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32205-4)
- Sims, J. R., Zimmer, J. A., Evans, C. D., Lu, M., Ardayfio, P., Sparks, J., Wessels, A. M., Shcherbinin, S., Wang, H., Monkul Nery, E. S., Collins, E. C., Solomon, P., Salloway, S., Apostolova, L. G., Hansson, O., Ritchie, C., Brooks, D. A., Mintun, M., Skovronsky, D. M., ... Zboch, M. (2023). Donanemab in Early Symptomatic Alzheimer Disease. *JAMA*, 330(6), 512. <https://doi.org/10.1001/jama.2023.13239>
- Thapa, P., Upadhyay, S. P., Suo, W. Z., Singh, V., Gurung, P., Lee, E. S., Sharma, R., & Sharma, M. (2021). Chalcone and its analogs: Therapeutic and diagnostic applications in Alzheimer’s disease. *Bioorganic Chemistry*, 108, 104681. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2021.104681>
- Trott, O., & Olson, A. J. (2010). AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31(2), 455–461. <https://doi.org/10.1002/jcc.21334>
- van Dyck, C. H., Swanson, C. J., Aisen, P., Bateman, R. J., Chen, C., Gee, M., Kanekiyo, M., Li, D., Reyderman, L., Cohen, S., Froelich, L., Katayama, S., Sabbagh, M., Vellas, B., Watson, D., Dhadda, S., Irizarry, M., Kramer, L. D., & Iwatsubo, T. (2023). Lecanemab in Early Alzheimer’s Disease. *New England Journal of Medicine*, 388(1), 9–21. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2212948>
- Veber, D. F., Johnson, S. R., Cheng, H.-Y., Smith, B. R., Ward, K. W., & Kopple, K. D. (2002). Molecular Properties That Influence the Oral Bioavailability of Drug Candidates. *Journal of Medicinal Chemistry*, 45(12), 2615–2623. <https://doi.org/10.1021/jm020017n>
- Zhuang, C., Zhang, W., Sheng, C., Zhang, W., Xing, C., & Miao, Z. (2017). Chalcone: A Privileged Structure in Medicinal Chemistry. *Chemical Reviews*, 117(12), 7762–7810. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00020>

**TİTREŞİMLİ KASE BESLEYİCİLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ VE ZORLANMIŞ
TİTREŞİM KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ege ÖZTETİK

Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü,
Kırıkkale-Türkiye

Email: oztetikege@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7294-6337>

Sami ATICI

Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü,
Kırıkkale-Türkiye

Email: samiatici021@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9135-8872>

Doç. Dr. Hakan ARSLAN

Doç. Dr., Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği
Bölümü, Kırıkkale-Türkiye

Email: arslan@kku.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2019-1882>

Özet

Endüstriyel otomasyon hatlarında montaj, ayrıştırma ve yönlendirme işlemlerinin kesintisiz yürütülebilmesi için kullanılan vibrasyonlu kase besleyiciler (bowl feeder) yaygın ve kritik bir role sahiptir. Bu sistemlerin parça iletim verimliliği, tahrik mekanizmasının çalışma frekansı ile kase yapısının dinamik uyumuna doğrudan bağlıdır. Bu çalışmada, elektromanyetik bir sürücü ile tahrik edilen vibrasyonlu kase besleyicinin dinamik davranışları, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sistemin yapısal karakterizasyonunu çıkarmak ve olası rezonans frekanslarını belirlemek amacıyla öncelikle modal analiz gerçekleştirilmiş ve sistemin doğal frekansları ile mod şekilleri tespit edilmiştir. Elektromanyetik sürücünün yarattığı periyodik uyarma kuvvetleri altında sistemin genlik ve Frekans tepkilerini değerlendirmek üzere harmonik analiz uygulanmıştır. Buna ek olarak, sistemin 50, 100 ve 150 Hz gibi belirli tahrik frekansları altındaki davranışlarını ve zorlanmış titreşim karakteristiklerini incelemek amacıyla zamana bağlı geçici yapısal analiz yürütülmüştür. İncelemeler sonucunda düşük frekanslarda (50 Hz) titreşim genliğinin maksimuma ulaştığı görülmüştür. Yapılan çoklu analizler sonucunda elde edilen bulgular, besleyici sistemin titreşim genliklerinin optimize edilmesine, çalışma frekansının en verimli aralığa ayarlanmasına ve yapısal yorulma risklerinin en aza indirilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışma, elektromanyetik tahrikli titreşimli besleyicilerin tasarım süreçlerinde parça iletim hızını ve operasyonel stabiliteyi maksimize edecek ideal dinamik parametrelerin belirlenmesine katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Titreşimli Kase Besleyici, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Modal Analiz, Harmonik Analiz, Doğal Frekans

**INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIORS AND FORCED VIBRATION
CHARACTERISTICS OF VIBRATORY BOWL FEEDERS**

Abstract

Vibratory bowl feeders play a widespread and critical role in industrial automation lines, ensuring the uninterrupted execution of assembly, sorting, and routing operations. The part feeding efficiency of these systems directly depends on the dynamic compatibility between the operating frequency of the drive mechanism and the bowl structure. In this study, the dynamic behavior of an electromagnetically driven vibratory bowl feeder is comprehensively investigated using the finite element method (FEM). To characterize the system structurally and identify potential resonance frequencies, a modal analysis was initially conducted to determine the natural frequencies and mode shapes. A harmonic analysis was performed to evaluate the amplitude and frequency responses of the system under the periodic excitation forces generated by the electromagnetic drive. Furthermore, a transient structural analysis was carried out to examine the behavior and forced vibration characteristics of the system under specific driving frequencies, namely 50, 100, and 150 Hz. The investigations revealed that the vibration amplitude reached its maximum at the lower frequency of 50 Hz. The findings derived from these multiple analyses allow for the optimization of the feeder system's vibration amplitudes, the adjustment of the operating frequency to the most efficient range, and the minimization of structural fatigue risks. Ultimately, this study contributes to the determination of the ideal dynamic parameters required to maximize part feeding speed and operational stability during the design processes of electromagnetically driven vibratory feeders.

Keywords: Vibratory Bowl Feeder, Finite Element Method, Modal Analysis, Harmonic Analysis, Natural Frequency

1. Giriş

Gelişen imalat teknolojileri, seri üretim hatlarında parçaların hızlı, hassas, doğru yönelimle ve kesintisiz bir şekilde istiflenmesini, taşınmasını ve beslenmesini zorunlu hale getirmiştir. Endüstriyel otomasyon süreçlerinde parça besleme operasyonlarının optimize edilmesi, üretim çevrim sürelerinin düşürülmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Günümüzde endüstride yaygın biçimde kullanılan sistemlerin başında titreşimli kase besleyiciler gelmektedir. Bu sistemler, küçük parçaların otomatik olarak yönlendirilip üretim hattına düzenli bir şekilde beslenmesini sağlayarak montaj otomasyonu alanında önemli bir rol üstlenmektedir (Tet Makina, t.y.).

Titreşimli kase besleyiciler genel olarak bir kase, alt gövde, yaprak yay grubu, elektromanyetik tahrik ünitesi ve vibrasyon izolasyon ayaklarından oluşmaktadır. Sistemde titreşim, elektromıknatıs ve armatürden oluşan tahrik ünitesi tarafından üretilir. Elektromanyetik kuvvet, bobine uygulanan AC sinyale bağlı olarak periyodik bir şekilde artıp azalır ve kase, kendisini alt gövdeye bağlayan eğimli yaprak yaylar üzerinde titreşim yapmasına neden olur. Tahrik ünitesi her çevrimde kaseyi hafifçe yukarı doğru çeker; yayların eğimli konumlandırılması nedeniyle oluşan bu hareket hem düşey hem de yatay bileşenler içererek sisteme küçük bir dönel (burulma) hareket ekler. Bu birleşik titreşim hareketi, parçaların spiral kanal boyunca adım adım ileri yönlü hareket etmesini ve beslenmesini sağlar.

Bu sistemlerde yüksek enerji verimliliği ve optimum taşıma hızı elde edebilmek için elektromanyetik tahrik ünitesinin çalışma frekansının, sistemin doğal frekansına (mekanik rezonans bölgesine) yakın seçilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, kase sistemlerinin istenen çalışma genliğinde (örneğin 0.2 - 1.5 mm aralığında) ve dengeli bir biçimde işlev görebilmesi, kütle dağılımı ve yay rijitliğine bağlı olan dinamik karakteristiklerinin hassas bir şekilde analiz edilmesine bağlıdır.

Bir titreşimli dizici sisteminin tasarımı aşamasında, sadece doğal frekanslarının bilinmesi yeterli değildir; aynı zamanda sistemin kalkış anından kararlı çalışma rejimine geçişinin ve bu süreçte oluşan dinamik karakteristiğin de incelenmesi gerekmektedir. Literatürde titreşimli kase besleyicilerin kinematik davranışları, analitik modeller ve ayırık elemanlar yöntemi (DEM) ile parça etkileşimleri üzerine çeşitli çalışmalar bulunsun da (Kendimiz, 2007; Söğüt, 2022); periyodik elektromanyetik tahrik altındaki geçici (transient) dinamik tepkilerin ve zorlanmış titreşim karakteristiklerinin üç boyutlu sonlu elemanlar modelleriyle incelendiği araştırmalar oldukça sınırlıdır.

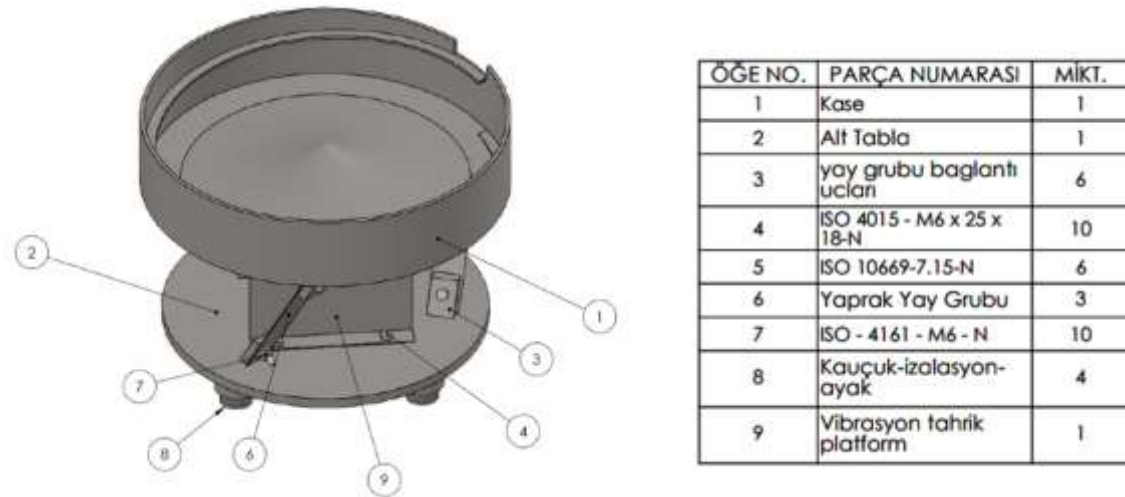
Bu bildirinin amacı, elektromanyetik tahrikli bir titreşimli kase besleyicinin dinamik davranışını ve zorlanmış titreşim karakteristiklerini üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri (FEM) üzerinden kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu doğrultuda sistemin; yapısal bütünlüğünü doğrulamak üzere statik analizleri, serbest titreşim karakteristiği ve burulma frekansını tespit etmek amacıyla modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Ardından sistemin frekans tepkisini gözlemlemek için harmonik analiz uygulanmış ve son olarak elektromanyetik tahrik kuvveti altında sistemin kalkış ve kararlı duruma geçişteki davranışını elde etmek amacıyla Geçici Yapısal Analiz kullanılarak zorlanmış titreşim özellikleri ortaya konmuştur. Sistem doğrulamasına yönelik ileri deneysel çalışmalar ise bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuş olup, ayrı bir araştırma makalesinde ele alınacaktır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, elektromanyetik tahrikli bir titreşimli kase besleyicinin dinamik karakteristiklerini incelemek amacıyla üç boyutlu (3B) bilgisayar destekli tasarım ve sonlu elemanlar analizi (SEA) yöntemleri kullanılmıştır.

2.1. Titreşimli Besleyici Geometrisi ve Malzeme Özellikleri

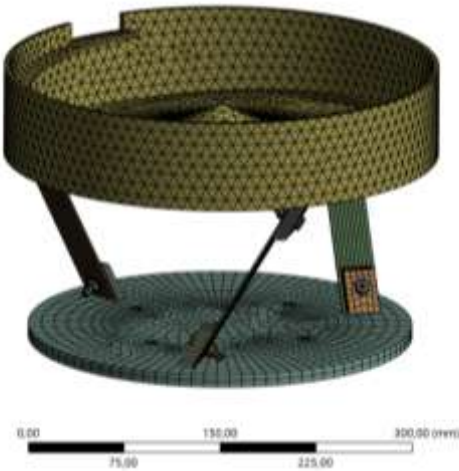
Analiz edilecek besleme sisteminin 3B katı modeli; kase, alt gövde (tabla), elektromanyetik tahrik ünitesi ve yaprak yaylardan oluşacak şekilde bir CAD yazılımında tasarlanmıştır. Kase geometrisi 340 mm çapında, 70 mm yüksekliğinde ve 3,65 derece helis eğimine sahip bir taşıma yolu barındıracak şekilde modellenmiştir. Aşınma direncini sağlamak ve imalat verimliliğini artırmak amacıyla kase ve ana gövde bileşenlerinde AISI 1010 düşük karbonlu çelik malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Sistemin doğal frekansını belirleyen ve titreşim yönelimini sağlayan yaprak yaylar ise 80x25x1,8 mm boyutlarında paslanmaz çelik malzemeden tasarlanmış; sistemde toplam 3 ayak ve her ayakta 1 adet yaprak yay kullanılmıştır. (Söğüt, 2022; Mucchi vd., 2013)



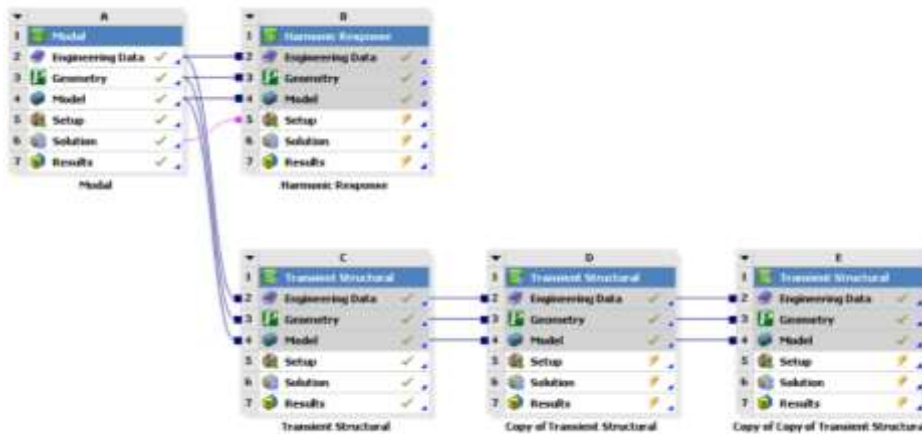
Şekil 1. CAD Ortamında Tasarlanan Kase Besleyici ve Parça Listesi

2.2.Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Şartları

Oluşturulan 3B katı model, sayısal analizlerin gerçekleştirilmesi için ANSYS Workbench sonlu elemanlar ortamına aktarılmıştır. Geometri üzerinde 3-10 mm boyut aralığında Quad/Tri Mixed (dörtgen/üçgen karışık) eleman tipine sahip bir ağ (mesh) yapısı oluşturulmuştur. Bu yapı toplamda 75.347 düğüm (node) ve 27.970 elemandan (element) meydana gelmektedir. Sistemin tüm bileşenleri arasındaki montaj yüzeyleri, rijit bir şekilde beraber hareket etmelerini sağlamak amacıyla tam bağlı (bonded) olarak tanımlanmış ve sistemin oturduğu alt taban yüzeyleri elastik mesnet ile sabitlenmiştir.



Şekil 2. Mesh Yapısı



Şekil 3. Ansys Workbench Analiz Modülleri

2.3.Modal Analiz Kurulumu

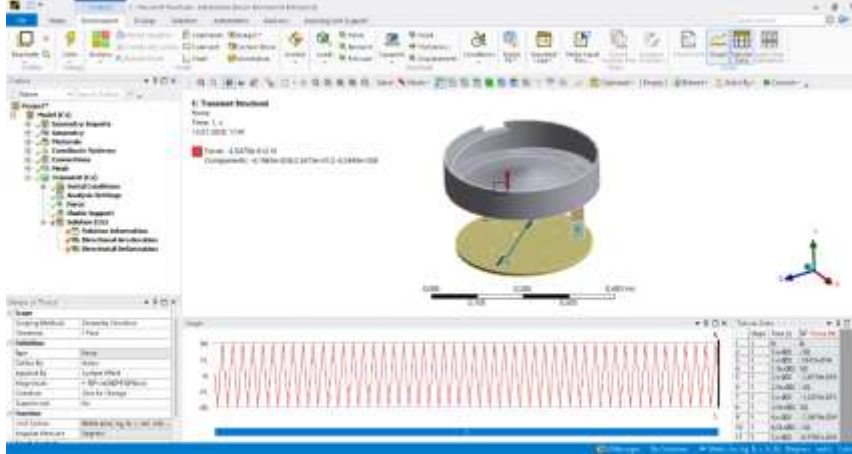
Sistemin serbest titreşim karakteristiğini, çalışma bölgesindeki rezonans frekanslarını ve bu frekanslara ait mod şekillerini belirlemek üzere statik analizdeki ankastre sınır şartları korunarak ön gerilmeli modal analiz gerçekleştirilmiş ve yapının ilk 12 doğal frekansı hesaplanmıştır. (Le vd., 2019)

2.4.Harmonik Analiz Kurulumu

Sistemin çalışma frekansındaki maksimum genliğini ve periyodik tahrik altındaki frekans cevabını incelemek amacıyla harmonik analiz gerçekleştirilmiştir. Sistemin rezonans durumunu ve yaprak yaylardaki kayıpları gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için çözücüye 0.02 yapısal sönüm oranı tanımlanmıştır. Elektromıknatısın çanağa ve alt tabana uyguladığı toplam 50 N büyüklüğündeki sinüzoidal tahrik kuvveti, ilgili armatür yüzeylerine sınır şartı olarak tanımlanmış ve 10 Hz ile 900 Hz aralığında geniş bir frekans taraması yapılmıştır.

2.5.Zorlanmış Titreşim (Transient Structural) Analizi Kurulumu

Sistemin durağan halden kararlı rejim titreşimlerine geçişi sırasındaki zamana bağlı dinamik dalgalanmaları ve bu süreçte yaprak yaylarda oluşan maksimum eşdeğer gerilmeleri incelemek için Geçici Yapısal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Harmonik analizden farklı olarak, elektromıknatıstan kaynaklanan zamana bağlı sinüzoidal çekim kuvveti bir fonksiyon olarak sisteme doğrudan etki ettirilmiştir. Farklı tahrik rejimlerindeki kinematik tepkiyi karşılaştırmalı olarak belirleyebilmek için analiz; 50 Hz, 100 Hz ve 150 Hz olmak üzere üç farklı çalışma frekansı senaryosunda çözdürülmüştür. Ürünlerin tırmanma davranışı için kritik olan genlik değerlerini ölçmek amacıyla, Y-ekseni doğrultusundaki deplasman karakteristiği zaman-genlik grafikleri çizdirilmiştir.



Şekil 4. Ansys Analiz Ortamı

3. Bulgular ve Tartışma

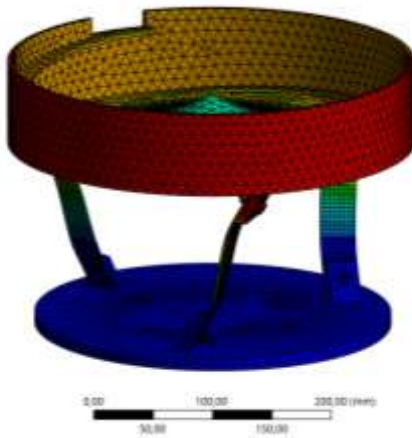
Bu bölümde, elektromanyetik tahrikli titreşimli kase besleyici sistemi üzerinde gerçekleştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen bulgular sunulmuş ve sistemin yapısal ile dinamik performansı değerlendirilmiştir. (Morrey ve Mottershead, 1986; Buzzoni vd., 2017).

3.1. Modal Analiz Bulguları

Sistemin serbest titreşim karakteristiğini belirlemek amacıyla yapılan modal analiz sonucunda, çanağın parçaları iletirmek için ihtiyaç duyduğu burulma hareketini (Y ekseninde) temsil eden 1. modun doğal frekansı 89,203 Hz olarak bulunmuştur. Sistemi etkileyen diğer kritik modlardan 2. mod (X ekseninde öteleme) 140,81 Hz, olarak tespit edilmiştir. Sistem için hedeflenen elektromanyetik tahrik frekansı 50-120 Hz aralığında olduğundan, tasarlanan sistemin istenilen rijitliği sağladığı görülmüştür. Birinci moddaki doğal frekans ile çalışma frekansı arasındaki rezonans marjının, sistemde aşırı genliği önlemek ve kararlı çalışmayı sağlamak için uygun seviyede olduğu teyit edilmiştir.

Tablo 1. Mod Frekansları

Mod	Frekans (Hz)
1	89,203
2	140,81
3	141,43
4	253,45
5	256,31
6	352,13
7	488,78
8	494,09
9	593,85
10	616,26
11	625,83
12	648,74



Şekil 5. 1.Mod Şekli

3.2.Harmonik Analiz Bulguları

Elektromıknatıs tarafından uygulanan 50 N büyüklüğündeki sinüzoidal kuvvet ve 0,02 yapısal sönüm oranı altında gerçekleştirilen harmonik analizde, sistemin frekans tepkisi incelenmiştir. Rezonans frekansı olan 89 Hz değerinde, çanağın en dış kenarındaki referans noktasından okunan maksimum dikey yer değiştirme 0,018 mm olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu toplam genlik değeri, dizilecek ürünlerin rampa üzerinde hareket edebilmesi için gereken fırlatılma açısını (throw angle) sağlamak açısından yeterli bir kinematik enerji ifade etmektedir. Frekans-genlik grafiğinde elde edilen tepe noktasının çalışma frekansına göre konumu, sistemin dinamik tasarımının başarılı olduğunu kanıtlamaktadır



Şekil 6. Frekans Cevap Grafiği

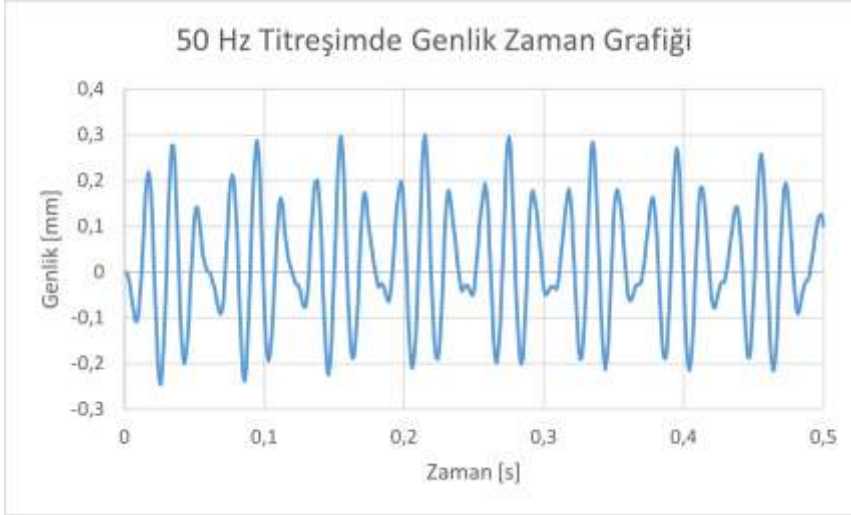
3.3. Zorlanmış Titreşim (Transient Structural) Analiz Bulguları

Geçici Yapısal Analiz sonuçları, sistemin 50 Hz, 100 Hz ve 150 Hz tahrik frekanslarındaki kalkış ve kararlı duruma geçiş davranışlarını net bir şekilde ortaya koymuştur.

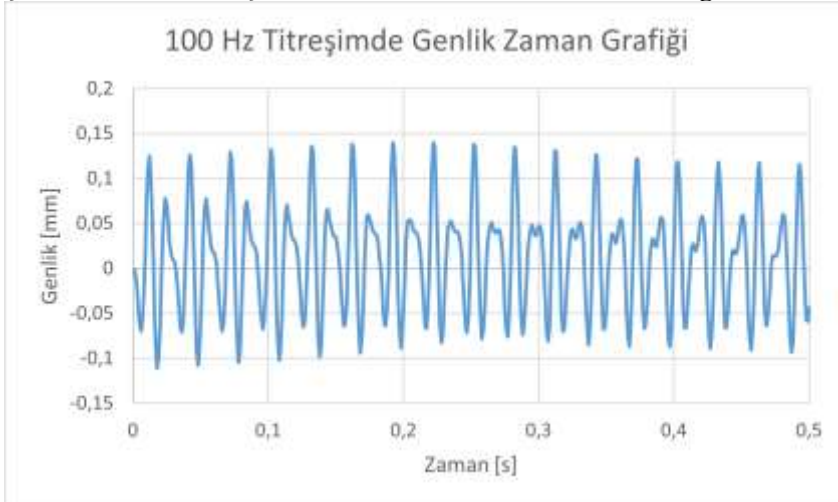
Analiz sonuçları incelendiğinde rezonans frekansına en yakın değer olan 100 Hz'lik tahrik durumunda, helis yolun uç noktasından alınan Y-ekseni deformasyon grafikleri incelendiğinde elde edilen genlik değerlerinin optimum çalışma genliği olan 0,2 mm bandına ulaştığı tespit edilmiştir. Tahrik frekansındaki artış, birim zamandaki salınım sayısını doğrudan artırdığından, sistemin maksimum titreşim genliğinde belirgin bir azalmaya neden olmaktadır.

Tahrik frekansını 50 Hz'den 100 Hz'e çıkması durumunda genliğinin 0.3'ten 0.15'e düştüğünü görüyoruz, ancak tahrik frekansını 50 Hz den 150 Hz'e çıkattığımızda ise maksimum genliğin yaklaşık 10 kat azaldığını ve 0.04 mm seviyesine gerilediğini görüyoruz. Frekanstaki artışla genliğin ters orantılı ve üstel olarak ilerlediğini görüyoruz.

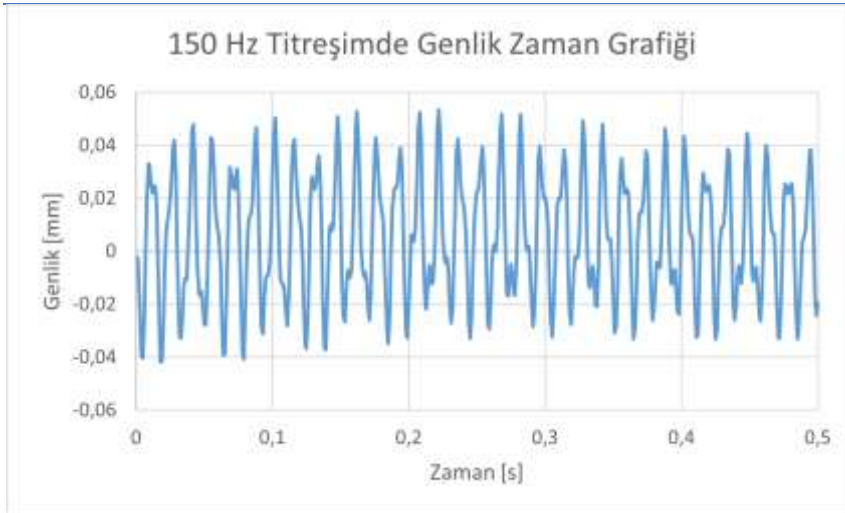
Bu sonuçlar istenilen çalışma frekansları içinde, sistem tasarımının sürekli dinamik yükler altında kinematik kriterleri karşıladığını ve hedeflenen tahrik koşulları altında güvenli bölgede çalıştığını kanıtlamaktadır. (Şekil 7-9)



Şekil 7. 50 Hz Titreşim Analizinde Genlik Zaman Grafiği



Şekil 8. 100 Hz Titreşim Analizinde Genlik Zaman Grafiği



Şekil 9. 150 Hz Titreşim Analizinde Genlik Zaman Grafiği

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, elektromanyetik tahrikli titreşimli kase besleyici sisteminin kavramsal tasarımı ve dinamik davranışları üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak incelenmiştir.

Uygulanan modal analiz ile sistemin serbest titreşim davranışları incelenmiş ve ürünlerin yönlendirilmesi için asıl ihtiyaç duyulan burulma hareketini (Y ekseninde) temsil eden birinci modun doğal frekansı 89 Hz olarak tespit edilmiştir. Tasarlanan yaprak yayların, hedeflenen 50-120 Hz elektromanyetik tahrik aralığı için sisteme gerekli rijitliği ve rezonans marjını sağladığı görülmüştür.

Sistemin kalkış anından kararlı duruma geçişteki tepkisi; 50 Hz, 100 Hz ve 150 Hz tahrik frekansları için ayrı ayrı incelenmiştir. Doğal frekansa yakın olan 100 Hz'lik tahrik durumunda optimum çalışma genliğine (yaklaşık 0,2 mm bandına) ulaşıldığı görülmüştür. Tahrik frekansının artmasıyla birlikte birim zamandaki salınım sayısının yükselmesi, maksimum genlikte sönümlenmeye yol açmış; frekans 150 Hz'e çıkarıldığında genliğin üstel ve ters orantılı olarak azalarak 0,04 mm seviyelerine gerilediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, geliştirilen titreşimli kase besleyici tasarımının yapısal bütünlüğü ve hedeflenen zorlanmış titreşim karakteristikleri sayısal yöntemlerle başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Elde edilen veriler, sistemin kararlı ve verimli bir parça besleme operasyonu için uygun olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- TetMakina. (t.y.). *Besleme sistemleri hakkında*. Erişim tarihi: 13 Temmuz 2026, <https://www.tetmak.com/blog/besleme-sistemleri-hakkinda/>
- Söğüt, Y. O. (2022). *Vibrasyonlu dikey helezon konveyör tasarımı ve analizi* [Yüksek lisans tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Kendimiz, H. (2007). *Salınlı ve titreşimli götürücüler ve bunların tasarım kriterleri* [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=201155&no=201155>
- Morrey, D., ve Mottershead, J. E. (1986). *Modelling of vibratory bowl feeders*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science*
- Buzzoni, M., Battarra, M., Mucchi, E., ve Dalpiaz, G. (2017). *Motion analysis of a linear vibratory feeder: Dynamic modeling and experimental verification*. *Mechanism and Machine Theory*, 114, 98-110.
- Mucchi, E., Di Gregorio, R., ve Dalpiaz, G. (2013). *Elastodynamic analysis of vibratory bowl feeders: Modeling and experimental validation*. *Mechanism and Machine Theory*, 60, 60-72.
- Le, G. N., Nguyen, V. M., ve Dang, A. T. (2019). *A method to design vibratory bowl feeder by using FEM modal analysis*. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 57(1), 102. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/57/1/12859>

**INTEGRATION OF DUAL FUEL MARINE ENGINE AND FUEL CELL FOR MARITIME
DECARBONISATION**

Assist. Prof. Dr. Caglar Dere (ORCID: 0000-0003-1670-1998)

İzmir Kâtip Çelebi University, Faculty of Naval Architecture and Maritime, Department of Marine
Engineering, İzmir-Türkiye

Email: caglar.dere@ikc.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1670-1998>

Abstract

In line with the stringent decarbonisation targets set by the International Maritime Organization (IMO), the global shipping industry is rapidly shifting toward alternative and low-carbon intensity fuels. Among these, methanol stands out as a highly promising marine fuel due to its low carbon content and ease of onboard storage under ambient conditions, making it suitable for both internal combustion engines and fuel cells. This study investigates the integration of dual-fuel marine main engines, running on lower-carbon fuels such as LNG and methanol, with high-temperature fuel cells. The performance of the proposed hybrid propulsion system was evaluated under a one-year vessel operation scenario, and the results were compared against the baseline carbon emission values of traditional marine diesel oil (MDO) operations. Utilizing the high-temperature exhaust gas and waste heat from the fuel cell stack significantly improves the operational efficiency of the powertrain. The findings demonstrate that by incorporating carbon capture technologies and waste heat recovery systems like the Organic Rankine Cycle (ORC), it is possible to design next-generation propulsion systems that offer both ultra-low emissions and superior efficiency. On the economic front, although the initial capital expenditure of the integrated system is relatively high, significant carbon tax advantages are achieved through reduced carbon emissions. Considering the unavoidable upcoming strict emission regulations and their associated tax burdens, these financial advantages are projected to offset the high initial investment costs and shorten the project's payback period.

Keywords: Maritime Decarbonisation, Dual-Fuel Engines, Fuel Cells, Methanol, Carbon Capture

1. Introduction

The maritime transport sector accounts for approximately 2.5-3% of global anthropogenic carbon dioxide emissions (IMO, 2020). Although the sector accounts for a relatively small share of global emissions, its absolute emission volume renders maritime decarbonization a critical focal point in the global mitigation of climate change. In pursuit of its climate action goals, the IMO has established phased targets to mitigate maritime emissions. Benchmarked against 2008 levels, the strategy aims to achieve a minimum reduction of 40% by 2030 and at least 70% by 2040 in CO₂ emissions per transport work, while striving toward a definitive net-zero emissions target by 2050 (IMO, 2023).

In order to support the maritime industry's alignment with 2050 net-zero targets, the European Union has implemented two foundational regulations that address both the cost and the composition of marine energy. The EU Emissions Trading System (EU-ETS), integrated into the sector in 2024, serves as a market-based tool that requires operators to purchase allowances for carbon emissions generated during voyages to or from EU ports (UNCTAD, 2025). Complementing this, the FuelEU Maritime regulation, effective from January 2025, mandates a progressive reduction in the greenhouse gas intensity of energy used on board, targeting a 80 per cent reduction by 2050 to accelerate the adoption of alternative low-carbon fuels. More than 50% of the global newbuilding orderbook consists of alternative-fueled vessels, with LNG-fueled ships accounting for the largest share at 36% in this segment (DNV, 2025; UNCTAD, 2025). Maersk, one of the world's leading shipping companies operating a fleet of over 700 vessels, has initiated a retrofitting program to enable its existing ships to operate on methanol. The company's commitment to retrofitting 11 vessels, combined with an order book of 25 methanol-powered newbuilds, underscores its confidence that methanol will become one of the most prominent alternative fuels in the future (Justus Krüger, 2024). With a boiling point of approximately 64.7°C, methanol remains liquid at ambient temperatures, simplifying fuel handling. However, it has lower energy densities as 16 MJ/kg gravimetric and 13 MJ/L volumetric (Verhelst, Turner, Sileghem, & Vancoillie, 2019) necessitate substantially greater storage capacity and fuel tank optimization onboard the vessel.

This study investigates the application of molten carbonate fuel cells (MCFC) and carbon capture systems (CCS) for mitigating carbon emissions from internal combustion engines (ICE) utilizing methanol fuel. The following sections detail the operational architectures of both the carbon capture systems and the MCFC integration. Subsequently, the results section delivers the comprehensive system design alongside a rigorous quantification of the potential carbon emission reductions achieved by the proposed framework.

2. Materials and Methods

Fundamentally, mitigating shipboard exhaust CO₂ emissions relies heavily on the adoption of low-carbon fuels, primarily liquefied natural gas (LNG), methanol, ethanol, ammonia, and hydrogen. Beyond their chemical composition, the life-cycle CO₂ footprint associated with their production pathways remains a critical determinant; for instance, over 99% of currently available methanol is still derived from fossil sources due to insufficient production infrastructure (DNV, 2025). Consequently, on-board carbon capture and storage (OCCS) emerges as a compelling alternative solution for the maritime sector, despite its energy consumption. Given its proven deployment in land-based facilities, capturing and storing carbon on board presents a reliable near-term strategy. Furthermore, this technology offers a critical pathway for securing the remaining operational lifespan of vessels for which engine or fuel retrofits are technically and economically unfeasible (Kan, Yang, Wang, Zhang, & Wu, 2026).

Carbon capture technologies are fundamentally classified into three primary stages based on their specific application within fuel usage or industrial processes: post-combustion, pre-combustion, and oxy-fuel combustion capture (Kan et al., 2026). Among these methodologies, solvent-based capture which is implemented at post combustion stage is recognized as the most technologically mature and widely implemented approach in both power generation and industrial sectors (Sahin & Karakurt, 2026). Solvent based process includes, the exhaust gas get cooled and directed through an absorption column where CO₂ is absorbed by a liquid solvent, the Mono-ethanolamine (MEA). The MEA remains the most prevalent solvent in these applications due to its good chemical reactivity rate and capture efficiency (Sahin & Karakurt, 2026). However, MEA often presents limitations in capacity and high regeneration

energy, it can be mixed with di-ethanolamine (DEA) or methyl di-ethanolamine (MDEA), to enhance operational performance (Gray et al., 2005). Alternatively, physical absorption techniques are particularly convenient for pre-combustion capture methods. The mechanism of physical absorption involves the dissolution of gas molecules into liquid solvents under high partial pressures, which are subsequently released through low pressure (Zhai & Rubin, 2018). This pressure change sequence enables the cyclic regeneration and efficient reuse of the solvent. While chemical absorption fundamentally relies on thermally driven reactions, physical scrubbing is a pressure-driven process. Another carbon capture methodology, adsorption, can be categorized into chemical and physical-based mechanisms. This process operates via the adhesion of gas molecules onto a porous material; subsequently, temperature and pressure differentials are generated to release these gas molecules into alternative mediums, thereby enabling sorbent regeneration. While gas molecules are adsorbed at lower temperatures, desorption occurs at elevated thermal levels. Consequently, Temperature Swing Adsorption (TSA) presents a viable on-board application for marine exhaust gases characterized by thermal fluctuations (Zeng, Qu, Xu, & Luo, 2022).

Membrane separation techniques utilize the differential permeability rates of CO₂ relative to other gas components, allowing for implementation in both pre- and post-combustion configurations. While this technology offers distinct design advantages and high integration capability, its relatively low selectivity performance (Dubey & Arora, 2022) often necessitates the deployment of multistage systems, thereby escalating both capital cost and operational complexity.

Cryogenic separation operates by establishing low-temperature conditions and exploiting the distinct condensation points of CO₂ relative to other gaseous components (Leung, Caramanna, & Maroto-Valer, 2014). While this process necessitates significant energy expenditure for compression and cooling of the exhaust stream, it facilitates the recovery of high-purity CO₂ (Brunetti, Scura, Barbieri, & Drioli, 2010). Achieving such high purity is essential for storage applications, as it mitigates the risks of corrosion and equipment degradation.

MCFCs incorporate an electrochemical mechanism that directly converts chemical energy into electrical energy. They operate at elevated temperatures, averaging approximately 650 °C (923 K) (Carapellucci, Cipollone, & Di Battista, 2017), a thermal regime necessary to enhance the ionic conductivity of the electrolyte. Although hydrogen serves as the primary fuel, the fundamental electrochemical reaction occurs at the anode, where hydrogen reacts with carbonate ions migrating through the electrolyte to produce water, carbon dioxide, and electrons. Beyond pure hydrogen, MCFCs possess the fuel flexibility to utilize alternatives such as methane, biogas, methanol, and ethanol (Dybiński, Milewski, Szabłowski, Szczęśniak, & Martinchyk, 2023). However, these carbonaceous fuels require a reforming process at the anode side; during this stage, high operational heat and catalysts are utilized to generate a hydrogen-rich gas mixture, which may also contain H₂O, CO, and CO₂. The operational principle of the MCFC, specifically modeled using methanol for the scope of this study, is illustrated in Figure 1.

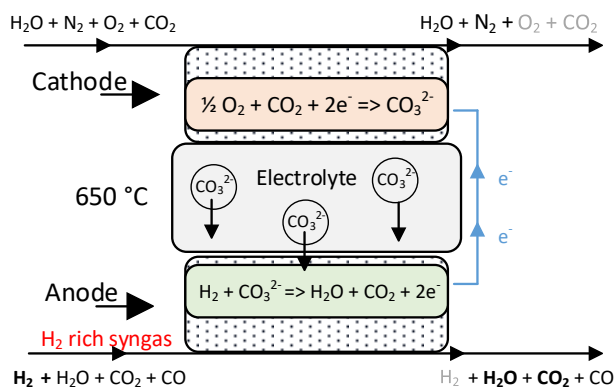


Figure 1. Molten Carbonate Fuel Cell operating scheme.

In Figure 1, bold-typed molecular representations indicate a high concentration of the respective species, whereas light-colored, semi-transparent representations denote a low concentration. This visual

differentiation illustrates the progressive increase or decrease in molecular concentrations resulting from the electrochemical and reforming reactions. Molten carbonate fuel cells offer strong potential for marine integration, drawing on their verified track record of carbon capture in electrical power generation.

Given the increasing proliferation of methanol-powered internal combustion engines (ICEs), designing an integrated system where both the fuel cell and the ICE utilize methanol represents a highly pragmatic approach.

The core rationale of this study addresses a critical operational trade-off: conventional carbon capture technologies deployed within the exhaust streams of ICEs inevitably escalate both capture costs and overall energy consumption, thereby degrading total system efficiency (X. Luo & Wang, 2017). To mitigate this penalty, it is hypothesized that the integration of a fuel cell can successfully compensate for the ancillary energy demands of the capture process, thereby preventing a net decline in overall thermal efficiency (Berry, Roy, Roy, & Roskilly, 2025).

3. Findings and Discussion

The ultimate objective of this study is to mitigate carbon emissions in internal combustion engines (ICEs) through the integration of carbon capture technologies, thereby aligning with the IMO net-zero trajectory by leveraging renewably produced methanol. Due to the inherent chemical composition of carbonaceous fuels, the generation of CO₂ is unavoidable. The exhaust stream of a methanol-fueled ICE typically comprises N₂, H₂O, CO₂, O₂, and NO_x. To isolate CO₂ from this mixture, various post-combustion separation methodologies are detailed in the methodology section. Although cryogenic separation is theoretically viable due to the divergent condensation points of N₂ and CO₂, cooling the entire volume of the exhaust gas to such extreme thermal levels imposes a severe parasitic load on the system, rendering it unfeasible for practical shipboard applications. To circumvent the prohibitive energetic penalties associated with cooling the entire flue gas stream (CO₂, N₂, O₂, SO_x), Molten Carbonate Fuel Cells present a cost-effective alternative that operates without the need for prior thermal drawdown. By virtue of their fundamental electrochemical principles, MCFCs reduce CO₂ molecules at the cathode into carbonate ions (CO₃²⁻), which then migrate through the electrolyte to the anode. At the anode, these ions react with a hydrogen-rich gas to generate CO₂ and H₂O, while simultaneously generating an electron flow. Consequently, the system simultaneously achieves dual functionality: electricity generation and carbon separation. Assuming a configuration where both power generation systems utilize methanol, deploying an MCFC within the exhaust stream of the marine prime mover enables a significant portion of the CO₂ to be concentrated at the anode via (CO₃²⁻) migration driven by the cathode reaction. The CO₂ capture efficiency at the cathode side is approximately 90% (H. Luo, Cheng, Barckholtz, Greig, & Larson, 2024; Marefati, Mehrpooya, & Shafii, 2019). The specific reaction pathways facilitating this CO₂ transport to the anode are illustrated in Figure 2.

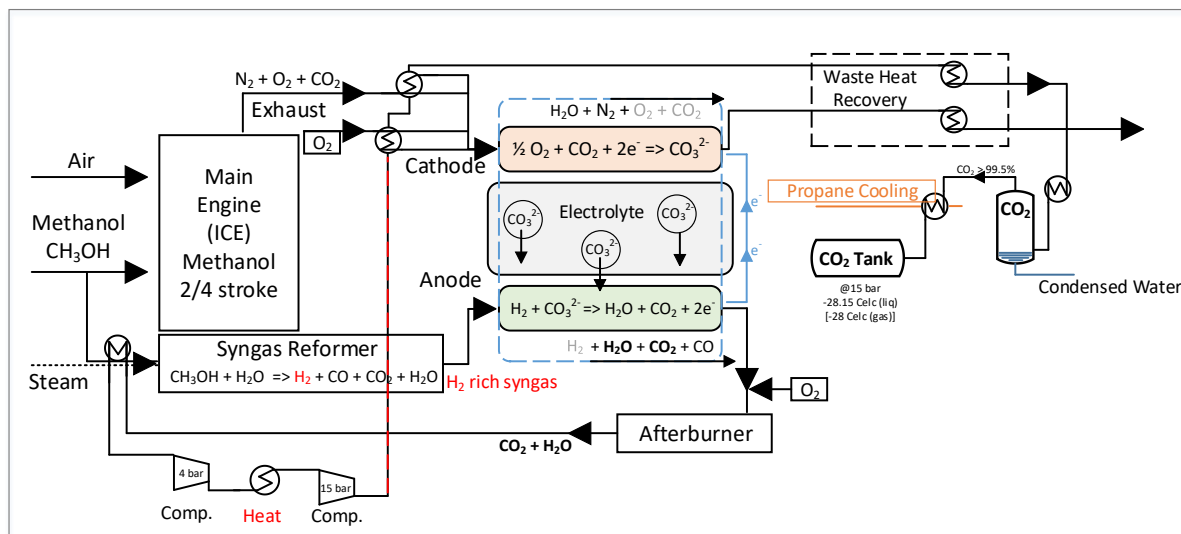


Figure 2. Overall system representation ICE+MCFC+CC+WHR

Through these electrochemical pathways, a highly concentrated CO₂ gas stream accumulates at the MCFC anode, establishing this site as the optimal location for final separation. In addition to H₂O and CO₂, the anode exhaust contains unreacted H₂ molecules. Because these residual molecules retain substantial chemical energy, they are directed to an afterburner and combusted in the presence of O₂, generating high-grade thermal energy. This released heat is subsequently routed to a heat exchanger to drive the endothermic methanol steam reforming (syngas) reaction, thereby recycling the energy back into the fuel cell fuel conditioning system.

Following the multi-stage compression of the CO₂ and H₂O mixture, interspaced with inter heaters, the recovered thermal energy is utilized within the MCFC cathode stream to elevate its operating temperature. Subsequently, any residual high-grade heat can be recovered via a Waste Heat Recovery System (WHRS). The thermal drawdown of the mixture is further extended as it enters a knockout drum, where H₂O is condensed and separated from the gaseous CO₂. This separation mechanism yields a captured CO₂ stream with a purity exceeding 99.5%. Achieving this high purity threshold is critical for downstream storage and transport infrastructure, as it effectively mitigates the risks of structural corrosion and mechanical wear within the shipboard system.

The comparative operational and financial simulation results for a single 20-day voyage, consisting of 480 hours of continuous operation at a 75% load factor producing 360,000 kWh of energy, indicate a clear divergence between the examined propulsion strategies. The analysis quantifies the macro-economic trade-offs between conventional Marine Diesel Oil (MDO) propulsion and a Methanol-fueled configuration integrated with an Onboard Carbon Capture and Storage (OCCS) system operating at a 90% capture efficiency.

In the baseline scenario utilizing conventional MDO, an average specific fuel oil consumption (SFOC) of 185 g/kWh yielded a total voyage fuel consumption of 66.6 tons. Based on the standard carbon conversion factor for marine distillates, this fuel consumption generated 213.5 tons of gross carbon dioxide emissions discharged directly into the atmosphere. Under the market conditions, this unmitigated configuration incurred a total carbon compliance penalty of 39,924.5 USD for the single voyage. This compliance cost comprises 18,574.5 USD in EU ETS liabilities, calculated at a reference market price of 87 USD per ton of carbon dioxide equivalent, and an additional 21,350.0 USD in potential global International Maritime Organization (IMO) market-based levies, evaluated at a projected Tier 1 penalty rate of 100 USD per ton.

In the alternative configuration utilizing methanol combined with an onboard carbon capture system, the lower energy density of the alternative fuel altered the operational inputs, requiring a baseline specific fuel consumption of 370 g/kWh. Furthermore, the thermodynamic and chemical processing requirements of the solvent-based or cryogenic OCCS plant introduced a 10 percent structural energy penalty, increasing the total voyage fuel requirement to 146.5 tons of methanol. Consequently, the gross carbon footprint generated by the combustion process was 201.4 tons of carbon dioxide. The integrated OCCS successfully isolated 181.3 tons of this total mass, confining the net atmospheric discharge of the vessel to 20.1 tons of carbon dioxide.

The retention of the captured carbon required a dedicated storage framework. To safely maintain the 181.3 tons of liquefied carbon dioxide under cryogenic conditions at minus 29 degrees Celsius and 15 bar of pressure, the minimum required volumetric capacity for the independent Type C cylindrical containment tanks was determined to be 185 cubic meters. This calculation accounts for a liquid density of 1.07 tons per cubic meter and a conservative 95 percent upper filling limit to accommodate boil-off gas behavior. The physical installation of these pressurized vessels compromised the revenue-generating space of the vessel, introducing a cargo displacement penalty valued at 18,500 USD, based on a representative freight loss rate of 100 USD per cubic meter of cargo space per voyage.

Despite the spatial and energetic penalties, the drastic reduction in atmospheric carbon release heavily suppressed the regulatory exposure of the vessel. Under this framework, the voyage-specific EU ETS liability dropped to 1,748.7 USD, while the potential IMO global tax was minimized to 2,010 USD. This shift represents a total regulatory tax avoidance of 36,165.8 USD compared to the conventional MDO baseline. Additionally, discharging the captured 181.3 tons of liquefied carbon dioxide at reception facilities for subsequent industrial utilization or geological sequestration at a commercial transfer rate of 40 USD per ton generated an active revenue stream of 7,252 USD.

When balancing these operational expenditures, regulatory penalties, and auxiliary revenues, the methanol and OCCS configuration demonstrated a net financial advantage of 24,918 USD for the 20-day voyage and 323,934 USD annually, over the conventional operating framework. These findings indicate that the implementation of market-based carbon instruments provides a sufficient financial buffer to completely absorb the spatial volume penalties and energy penalties associated with carbon capture machinery, improving the overall commercial viability of low-carbon seaborne logistics.

4. Conclusion and Recommendations

This study demonstrates that integrating a Methanol-fueled propulsion system with Onboard Carbon Capture and Storage is financially and operationally viable. Utilizing MCFC alongside methanol effectively mitigates stringent regulatory liabilities from the EU ETS and IMO, completely offsetting the associated spatial and energy penalties through tax avoidance and carbon sales. This approach significantly enhances the commercial feasibility of low-carbon marine operations. System modelling and detailed calculations will be the focus of further studies.

Thanks and Information Note

This work was supported by the Izmir Kâtip Celebi University Scientific Research Projects Coordination Unit under Project No. 2024-GAP-GIDF-0008. The authors gratefully acknowledge this support.

References

- Berry, S., Roy, D., Roy, S., & Roskilly, A. P. (2025). Marine high-temperature fuel cell power and propulsion system with integrated carbon capture: A techno-economic study. *Applied Energy*, 400, 126504. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126504>
- Brunetti, A., Scura, F., Barbieri, G., & Drioli, E. (2010). Membrane technologies for CO₂ separation. *Journal of Membrane Science*, 359(1–2), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.11.040>
- Carapellucci, R., Cipollone, R., & Di Battista, D. (2017). Modeling and characterization of molten carbonate fuel cell for electricity generation and carbon dioxide capture. *Energy Procedia*, 126, 477–484. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.228>
- DNV. (2025). *Maritime Forecast to 2050: Energy Transition Outlook 2025*. DNV.
- Dubey, A., & Arora, A. (2022). Advancements in carbon capture technologies: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133932>
- Dybiński, O., Milewski, J., Szabłowski, Ł., Szcześniak, A., & Martinchyk, A. (2023). Methanol, ethanol, propanol, butanol and glycerol as hydrogen carriers for direct utilization in molten carbonate fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(96), 37637–37653. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.091>
- Gray, M. L., Soong, Y., Champagne, K. J., Pennline, H., Baltrus, J. P., Stevens, R. W., ... Filburn, T. (2005). Improved immobilized carbon dioxide capture sorbents. *Fuel Processing Technology*, 86(14–15), 1449–1455. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.01.005>
- IMO. (2020). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study*. International Maritime Organization.
- IMO. (2023). *Resolution MEPC.377(80): 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships* (No. MEPC 80/17/Add.1). IMO Marine Environment Protection Committee.
- Justus Krüger. (2024). The blueprint for converting VLCVs to methanol. *Everllence*. Retrieved from <https://www.everllence.com/discover-stories/maersk-halifax-retrofit>
- Kan, A., Yang, J., Wang, Q., Zhang, Z., & Wu, H. (2026). Advancements and challenges of Onboard Carbon Capture, Utilization and Storage technologies for marine industry: A state-of-the-art review. *Marine Pollution Bulletin*, 222, 118848. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118848>
- Leung, D. Y. C., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426–443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>
- Luo, H., Cheng, F., Barckholtz, T. A., Greig, C., & Larson, E. D. (2024). Biopower with molten carbonate fuel cell carbon dioxide capture: Performance, cost, and grid-integration evaluations.

- Energy Conversion and Management*, 322, 119167.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119167>
- Luo, X., & Wang, M. (2017). Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation. *Applied Energy*, 195, 402–413.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.027>
- Marefati, M., Mehrpooya, M., & Shafii, M. B. (2019). A hybrid molten carbonate fuel cell and parabolic trough solar collector, combined heating and power plant with carbon dioxide capturing process. *Energy Conversion and Management*, 183, 193–209.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.002>
- Sahin, K. H., & Karakurt, A. S. (2026). Performance analysis and optimization of integrated waste heat recovery for MEA-based onboard carbon capture and CO₂ liquefaction in marine applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 176, 111347.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.111347>
- UNCTAD. (2025). *Review of maritime transport 2025: Staying the course in turbulent waters*. New York: United Nation Publications.
- Verhelst, S., Turner, J. W., Sileghem, L., & Vancoillie, J. (2019). Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 43–88.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>
- Zeng, H., Qu, X., Xu, D., & Luo, Y. (2022). Porous Adsorption Materials for Carbon Dioxide Capture in Industrial Flue Gas. *Frontiers in Chemistry*, 10, 939701.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2022.939701>
- Zhai, H., & Rubin, E. S. (2018). Systems Analysis of Physical Absorption of CO₂ in Ionic Liquids for Pre-Combustion Carbon Capture. *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4996–5004.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00411>

**A REGIONAL ASSESSMENT OF PLANT PROTECTION PRODUCT USE TRENDS IN THE
GAP REGION, TÜRKİYE (2016–2024)**

Ozan AKAT, Ph.D

Ministry of Agriculture and Forestry, Diyarbakır Provincial Directorate of Agriculture and Forestry,
Plant Protection Department, Diyarbakır-Türkiye

Email: akatozan21@gmail.com , ozan.akat@tarimorman.gov.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1280-2321>

Muhlis SEZGİN, Ph.D.

Diyarbakır Plant Protection Research Institute Directorate, Diyarbakır-Türkiye

Email: muhlis.sezgin@tarimorman.gov.tr, m.sezgin1907@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4936-4169>

Prof. Selime ÖLMEZ BAYHAN

Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Plant Protection, Diyarbakır-Türkiye

Email: : solmezbayhan@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2285-6518>

Prof. Erol BAYHAN

Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Plant Protection, Diyarbakır-Türkiye

Email: akatozan21@gmail.com , ozan.akat@tarimorman.gov.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7579-586X>

Abstract

The Southeastern Anatolia Project (GAP) region of Türkiye encompasses nine provinces undergoing profound agricultural transformation driven by large-scale irrigation development. Despite this rapid intensification, no comprehensive spatiotemporal assessment of plant protection product (PPP) use exists for this region at the provincial scale. This study fills this void by analysing PPP use trends across all nine GAP provinces — Şanlıurfa, Diyarbakır, Gaziantep, Adıyaman, Mardin, Batman, Kilis, Şırnak, and Siirt — using official provincial-level data published by the Ministry of Agriculture and Forestry of Türkiye for the period 2016–2024. Non-parametric Mann–Kendall trend tests and Sen's slope estimation were applied to all provincial and pesticide-group time series. Spatial concentration was assessed using the Gini index and coefficient of variation. Total regional PPP use ranged from 3,228 to 5,838 thousand kg-L over the study period, peaking in 2023. At the provincial scale, statistically significant increasing trends were detected in Diyarbakır ($Z = 2.606$, $p = 0.009$, $\tau = 0.722$), Adıyaman ($Z = 2.606$, $p = 0.009$, $\tau = 0.722$), Mardin ($Z = 2.189$, $p = 0.029$, $\tau = 0.611$), Kilis ($Z = 2.189$, $p = 0.029$, $\tau = 0.611$), and Siirt ($Z = 3.232$, $p = 0.001$, $\tau = 0.889$). These provinces, currently low-to-medium in absolute use, share a common trajectory of intensifying irrigated agriculture and represent an emerging second wave of pesticide intensification in the region. Herbicides consistently dominated PPP composition (31–47%), though their proportional share showed a non-significant declining tendency ($Z = -1.772$, $p = 0.076$). Fungicide use showed a statistically significant increase both in absolute terms ($Z = 2.189$, $p = 0.029$) and as a structural component of the PPP mix, signalling a compositional shift linked to the expansion of disease-sensitive cropping systems. Spatial concentration was high throughout the study period (Gini index: 0.445–0.687) but showed a statistically significant declining trend ($Z = -1.981$, $p = 0.048$), indicating a gradual redistribution of PPP use across the region. These findings reveal a spatially differentiated pattern of pesticide intensification and underscore the importance of province-specific integrated pest management (IPM) strategies adapted to the GAP region's diverse and rapidly evolving agricultural landscape.

Keywords: Plant protection products; GAP region; Mann–Kendall; Gini index; Spatiotemporal analysis; Herbicides; Fungicides; Integrated pest management; Türkiye

1. Introduction

The intensification of agricultural production required to meet global food demand has been consistently associated with rising reliance on plant protection products (PPPs) across diverse agroecological settings (FAO, 2022; Tilman et al., 2011). While pesticides play a critical role in protecting crop yields and ensuring food security, their excessive or poorly targeted use poses significant risks to biodiversity, ecosystem integrity, and human health (Popp et al., 2013; IPBES, 2019; Carvalho, 2017). Understanding long-term temporal trends and spatial heterogeneity in pesticide use has therefore become a central priority in the research agenda for sustainable agriculture and integrated pest management (IPM) (Böcker & Finger, 2016; Lechenet et al., 2017).

The Southeastern Anatolia Project (GAP; Turkish: Güneydoğu Anadolu Projesi) is one of the most ambitious integrated regional development initiatives undertaken in Türkiye, encompassing nine provinces — Adıyaman, Batman, Diyarbakır, Gaziantep, Kilis, Mardin, Siirt, Şanlıurfa, and Şırnak — and aiming to harness the hydraulic potential of the upper Euphrates and Tigris basins to drive socioeconomic transformation in the region (GAP Regional Development Administration, 2023; Ünver, 1997). The irrigation infrastructure developed under GAP — including the Atatürk Dam, the largest earth-fill dam in Europe at the time of its completion, and associated canal networks — has enabled the progressive conversion of rain-fed dryland farming systems into irrigated, market-oriented agriculture at a scale without precedent in Türkiye's agricultural history (Kaya, 2006; Yercan & Atış, 2019).

This structural agricultural transformation has profound implications for crop protection demand. The shift from extensive rain-fed cereal production toward intensive double-cropped cotton, soybean, maize, and vegetable systems under irrigation fundamentally alters the composition and intensity of pest complexes, introduces new disease environments under humid canopy conditions, and increases the economic stakes of yield protection, thereby elevating incentives for pesticide application (Tiryaki et al., 2010; Zhang et al., 2018). Cotton production in the Harran and Şanlıurfa plains, in particular, has long been associated with intensive insecticide use targeting *Helicoverpa armigera*, *Spodoptera exigua*, *Aphis gossypii*, and *Bemisia tabaci*, while the expansion of double-cropping systems creates new windows for weed emergence requiring herbicide interventions (Kaya, 2006; Popp et al., 2013).

Despite the scale of agricultural transformation in the GAP region and its well-documented implications for input use, no comprehensive long-term spatiotemporal assessment of PPP use at the provincial level has been published for this region. Existing studies on pesticide use in Türkiye have generally focused either on national-level trends (Tiryaki et al., 2010; Tiryaki & Canhilal, 2011) or on localized case studies examining specific crops, districts, or pesticide-user behaviour (Kışlalıoğlu & Berkes, 1985; Turabi, 2007; İnan & Boyraz, 2003). The absence of a spatiotemporal framework that integrates long-term provincial data across the entire GAP region constitutes a significant gap in the scientific and policy-relevant literature on pesticide governance in Türkiye.

Spatiotemporal analyses of pesticide use are increasingly recognized as essential tools for identifying subnational hotspots, detecting early signals of intensification, and designing spatially differentiated IPM policies (Böcker & Finger, 2016; Lechenet et al., 2017; Pretty & Bharucha, 2015). Non-parametric trend detection methods such as the Mann–Kendall test and Sen's slope estimator are well-established in environmental monitoring for their robustness against non-normal distributions, outliers, and short time series — characteristics that typify administratively collected provincial pesticide data (Yue et al., 2002; Pohlert, 2023). Spatial concentration indicators including the Gini index provide complementary information on the distributional inequality of pesticide inputs across geographic units and their evolution over time.

Against this background, the present study aims to provide the first systematic spatiotemporal assessment of PPP use across all nine GAP provinces for the period 2016–2024. The specific objectives are: (i) to quantify total and group-specific PPP use at the provincial and regional scales; (ii) to apply non-parametric trend analysis to detect statistically significant temporal changes at the provincial and group levels; (iii) to assess spatial concentration and its temporal evolution using the Gini index; (iv) to classify provinces into functional clusters based on their PPP use profiles; and (v) to interpret the observed patterns in the context of agricultural intensification, irrigation development, and their implications for sustainable pest management in the GAP region.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The GAP region covers an area of approximately 75,000 km² in the upper Euphrates–Tigris basin in southeastern Türkiye and encompasses nine provinces classified under the NUTS-3 (İBBS-3) level statistical units TRC11–TRC34: Gaziantep (TRC11), Adıyaman (TRC12), Kilis (TRC13), Şanlıurfa (TRC21), Diyarbakır (TRC22), Mardin (TRC31), Batman (TRC32), Şırnak (TRC33), and Siirt (TRC34). The region is characterized by a semi-arid continental climate, with hot dry summers (mean July temperatures 30–35°C in lowland plains), mild winters, and annual precipitation ranging from approximately 350 mm in the Harran Plain to over 700 mm in the Taurus foothills. These climatic conditions favour rapid weed establishment following irrigation, insect pest proliferation across multiple generations per season, and — increasingly as irrigated canopy environments develop — foliar fungal disease.

Irrigated agricultural area in the GAP region has expanded substantially since the commissioning of the first irrigation networks in the mid-1990s, with the Harran Plain (approximately 150,000 ha) and the Şanlıurfa–Mardin highland plains constituting the largest irrigated zones. Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) remains the dominant cash crop in the lowland irrigated zones of Şanlıurfa and Diyarbakır, while Gaziantep and Kilis provinces are characterized by extensive pistachio (*Pistacia vera* L.) and olive (*Olea europaea* L.) orchards. Adıyaman has important vegetable and pepper production areas. Mardin, Batman, Şırnak, and Siirt provinces retain a higher proportion of rain-fed and extensive production systems, including dryland wheat, lentils, and olive cultivation.

2.2. Data Sources and Preparation

Provincial-level PPP use data for the period 2016–2024 were obtained from official statistical publications of the Ministry of Agriculture and Forestry of the Republic of Türkiye (Tarım ve Orman Bakanlığı). These data are published annually in the statistical bulletin titled 'İl Düzeyinde Bitki Koruma Ürünlerinin Kullanım Miktarları' (Amounts of Use of Plant Protection Products at Provincial Level) and are publicly accessible via the Ministry's official statistical portal. Data are reported in kg-L per year for each NUTS-3 province and disaggregated into six major pesticide groups: insecticides, fungicides, herbicides, acaricides, rodenticides/molluscicides, and others (the latter encompassing plant activators, plant growth regulators, insect attractants, fumigants, and nematicides, as defined in the Ministry's reporting guidelines). All data were compiled and verified against the source publications prior to analysis. Units were standardized to kg-L throughout, and pesticide group classifications were confirmed to be consistent across reporting years. The nine GAP provinces were identified using their NUTS-3 codes and extracted from the provincial datasets covering all 81 provinces of Türkiye.

The temporal scope (2016–2024) reflects the availability of harmonized provincial-level data with consistent group disaggregation. Although national-level annual PPP consumption data are available from 2006 onward, provincially disaggregated data with the current reporting structure commenced in 2016, limiting the spatial analysis to this period. This limitation is acknowledged and discussed further in Section 4.4.

2.3. Temporal Trend Analysis

Long-term temporal trends in PPP use were assessed using the Mann–Kendall (MK) non-parametric trend test (Mann, 1945; Kendall, 1975), which evaluates the presence of a monotonic increasing or decreasing trend in a time series without requiring distributional assumptions. The MK test is widely applied in environmental and agricultural research because of its robustness to non-normal data, insensitivity to outliers, and suitability for short time series (Yue et al., 2002; Pohlert, 2023). The MK test statistic *S* and its standardized *Z* value were computed for each province and each PPP group. Statistical significance was evaluated at the 5% level ($p < 0.05$) as the primary threshold, with marginal significance noted at $p < 0.10$.

The magnitude and direction of detected trends were quantified using Sen's slope estimator (Sen, 1968; Theil, 1950), defined as the median of all pairwise slopes between data points. Sen's slope provides a robust estimate of the average rate of change per year in kg-L. Both the MK test and Sen's slope were applied to all nine provincial time series, to regional aggregate time series for total PPP use and each pesticide group, and to derived variables including pesticide group proportional shares (%) and the GAP region's share of national PPP consumption. All trend analyses were performed in Python 3 using the `pymannkendall` library (Hussain & Mahmud, 2019) and `scipy.stats.theilslopes`.

2.4. Spatial Concentration Analysis

Spatial concentration of PPP use across the nine GAP provinces was quantified annually using the Gini index (G), calculated as:

$$G = \frac{\sum_i \sum_j |x_i - x_j|}{2n^2\mu}$$

where x_i and x_j are PPP use values for provinces i and j , n is the number of provinces ($n = 9$), and μ is the mean provincial PPP use. Gini index values range from 0 (perfect equality) to 1 (maximum concentration). Complementary indicators included the coefficient of variation (CV) and the proportional share of the top three provinces in total regional PPP use. A Mann–Kendall trend test was also applied to the annual Gini index series to assess whether spatial concentration changed significantly over the study period.

2.5. Provincial Cluster Classification

To provide an interpretively useful grouping of provinces by their PPP use profile, provinces were classified into three functional clusters — high-use, medium-use, and low-use — based on their average annual total PPP use and the statistical significance of their temporal trends. This descriptive classification was used to structure the discussion of provincial trajectories and policy implications. Cluster assignments were validated against the Mann–Kendall trend results and dominant pesticide group profiles.

3. Results

3.1. Provincial PPP Use (2016–2024)

Annual provincial PPP use data for all nine GAP provinces and the regional aggregate are presented in Table 1. Pronounced variability was observed both within and across provinces, reflecting heterogeneity in agricultural system type, irrigation development stage, and crop-specific pest management demands.

Şanlıurfa recorded the highest average annual PPP use across the study period (1,401 thousand kg-L, or 33.2% of the regional total), but its temporal trajectory was among the most volatile: consumption peaked at 2,547 thousand kg-L in 2016, declined sharply to 691 thousand kg-L in 2021, and partially recovered to 1,806 thousand kg-L in 2023 before falling again to 955 thousand kg-L in 2024. This exceptional interannual variability (CV = 37.0%) is discussed further in Section 4.1. Diyarbakır ranked second in average use (855 thousand kg-L; 19.9% of regional total) and showed a statistically significant increasing trend over the study period. Gaziantep, the third largest contributor (741 thousand kg-L; 18.4%), exhibited no significant temporal trend.

Table 1. Annual PPP use (thousand kg-L) by province in the GAP region (2016–2024). Values for the regional aggregate (GAP Total) are summed across all nine provinces.

Province	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Average
Şanlıurfa	2,547	1,293	1,227	1,182	1,194	691	1,718	1,806	955	1,401
Diyarbakır	663	425	779	674	676	756	992	1,407	1,327	855
Gaziantep	531	776	996	799	800	827	600	652	689	741
Adıyaman	205	217	426	318	322	721	991	1,102	601	545
Mardin	267	367	479	538	552	487	669	666	536	507
Batman	32	76	85	62	64	64	67	72	85	67
Kilis	21	21	36	22	25	25	36	33	35	28
Şırnak	17	30	44	40	41	56	59	51	38	42
Siirt	21	23	23	24	26	34	42	49	39	31
GAP Total	4,304	3,228	4,094	3,659	3,699	3,661	5,175	5,838	4,305	4,218

Note. Data source: Ministry of Agriculture and Forestry of the Republic of Türkiye, provincial-level PPP use statistics (2016–2024). Values are rounded to the nearest thousand kg-L. The regional average is the mean annual total across all nine years.

Among the remaining provinces, Adıyaman showed the most pronounced relative increase over the study period, rising from 205 thousand kg-L in 2016 to over 1,100 thousand kg-L in 2023 — a greater than fivefold increase. Mardin displayed a steady upward trajectory. The four lowest-use provinces — Batman, Kilis, Şırnak, and Siirt — maintained consistently low absolute PPP quantities (range: 17–85 thousand kg-L) throughout the period, though Kilis and Siirt both exhibited statistically significant increasing trends.

3.2. Mann–Kendall Trend Analysis and Sen's Slope Estimation

Results of the Mann–Kendall trend tests and Sen's slope estimates for all nine provinces, the regional total, and the four major pesticide groups are presented in Table 2. Statistically significant increasing trends ($p < 0.05$) were detected in five of the nine provinces: Diyarbakır ($Z = 2.606$, $p = 0.009$, $\tau = 0.722$, Sen's slope = +98,677 kg-L yr⁻¹), Adıyaman ($Z = 2.606$, $p = 0.009$, $\tau = 0.722$, slope = +106,960 kg-L yr⁻¹), Mardin ($Z = 2.189$, $p = 0.029$, $\tau = 0.611$, slope = +40,663 kg-L yr⁻¹), Kilis ($Z = 2.189$, $p = 0.029$, $\tau = 0.611$, slope = +1,573 kg-L yr⁻¹), and Siirt ($Z = 3.232$, $p = 0.001$, $\tau = 0.889$, slope = +2,825 kg-L yr⁻¹). Notably, the two highest-use provinces — Şanlıurfa and Gaziantep — showed no significant temporal trend, primarily due to high interannual variability masking any underlying directional change.

At the regional aggregate level, the Mann–Kendall test for total PPP use did not yield a statistically significant trend ($Z = 1.355$, $p = 0.175$), reflecting the dominant influence of Şanlıurfa's high-variance trajectory on the regional sum. Among pesticide groups, fungicide use ($Z = 2.189$, $p = 0.029$, slope = +70,678 kg-L yr⁻¹) and acaricide use ($Z = 2.189$, $p = 0.029$, slope = +11,475 kg-L yr⁻¹) exhibited statistically significant increasing trends. Herbicide use and insecticide use showed no significant temporal trend at the group level.

Table 2. Mann–Kendall trend test results and Sen's slope estimates for provincial PPP use series and regional pesticide groups (2016–2024).

Series	MK Trend	Z	p	Tau (τ)	Sen's Slope (kg-L yr ⁻¹)	Sig.
Şanlıurfa	No trend	-0.938	0.348	-0.278	-46,802	—
Diyarbakır	Increasing	2.606	0.009	0.722	+98,677	**
Gaziantep	No trend	0.000	1.000	0.000	-5,504	—
Adıyaman	Increasing	2.606	0.009	0.722	+106,960	**
Mardin	Increasing	2.189	0.029	0.611	+40,663	*
Batman	No trend	1.355	0.175	0.389	+2,739	—
Kilis	Increasing	2.189	0.029	0.611	+1,573	*
Şırnak	No trend	1.564	0.118	0.444	+3,410	—
Siirt	Increasing	3.232	0.001	0.889	+2,825	**
GAP Total	No trend	1.355	0.175	0.389	+148,344	—
Fungicide	Increasing	2.189	0.029	0.611	+70,678	*
Acaricide	Increasing	2.189	0.029	0.611	+11,475	*
Herbicide	No trend	-1.772	0.076	-0.111	-12,186	—
Insecticide	No trend	0.000	1.000	0.000	+36,426	—

Note. ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; — not significant. Sen's slope is expressed in kg-L per year. MK tests conducted using the pymannkendall library (Hussain & Mahmud, 2019). $n = 9$ observations for all series. GAP Total and group-level analyses refer to regional aggregate values.

3.3. Pesticide Group Composition and Proportional Trends

Annual pesticide group composition expressed as percentage shares of total regional PPP use, the Gini index of spatial concentration, and the GAP region's share of national PPP consumption are presented in Table 3. Herbicides consistently accounted for the largest share of regional PPP use throughout the study period, ranging from 31.1% (2023) to 47.0% (2020). However, the herbicide share exhibited a marginally significant declining tendency over the nine-year period ($Z = -1.772$, $p = 0.076$, Sen's slope = -1.532 percentage points per year), suggesting an emerging compositional shift away from herbicide dominance.

Fungicide proportional share increased from 14.9% in 2016 to 26.9% in 2024, representing nearly a doubling of its relative contribution to regional PPP use. Although the Mann–Kendall test applied to the fungicide share did not reach statistical significance at the 5% level ($Z = 1.564$, $p = 0.118$), the consistency of the directional increase — with the exception of the anomalous year 2022 — supports interpretation as a structural compositional shift. Insecticide share was highly variable, peaking at 36.9% in 2022 before declining, and showed no significant overall trend. Acaricide use increased both in absolute terms (significant) and as a proportional share, particularly from 2021 onward.

Table 3. Annual pesticide group composition (%), Gini index of spatial concentration, top-3 provincial share, and GAP region share of national PPP consumption (2016–2024).

Year	Herbicide (%)	Insecticide (%)	Fungicide (%)	Acaricide (%)	Gini Index	Top-3 Share (%)	GAP/National (%)
2016	44.5	28.5	14.9	2.1	0.687	86.9	8.60
2017	43.8	27.3	22.6	3.9	0.580	77.2	5.97
2018	45.5	24.0	23.4	3.1	0.519	73.3	6.82
2019	44.2	26.5	22.5	2.7	0.529	72.6	7.13
2020	47.0	21.0	25.7	3.2	0.526	72.2	6.89
2021	39.1	22.5	31.7	3.8	0.445	62.9	6.91
2022	34.6	36.9	16.9	6.3	0.517	71.5	9.35
2023	31.1	31.4	24.6	4.8	0.528	73.9	10.11
2024	36.4	26.6	26.9	3.7	0.503	69.0	8.05

Note. Gini index calculated across nine GAP provinces annually. Top-3 share = cumulative PPP use of three highest-use provinces as percentage of regional total. GAP/National share = GAP regional total as percentage of national PPP consumption reported by the Ministry of Agriculture and Forestry.

3.4. Spatial Concentration and Its Temporal Evolution

The Gini index of provincial PPP use concentration was 0.687 in 2016 — indicating high inequality, with a small number of provinces accounting for a disproportionately large share of regional consumption. The three highest-use provinces (Şanlıurfa, Diyarbakır, and Gaziantep) accounted for 86.9% of total regional PPP use in 2016. The Gini index declined over the study period to values in the range of 0.445–0.529 between 2018 and 2024, with the Mann–Kendall test confirming a statistically significant decreasing trend ($Z = -1.981$, $p = 0.048$, Sen's slope = -0.010 per year). The top-3 provincial share correspondingly declined from 86.9% in 2016 to 69.0% in 2024.

This declining concentration reflects the simultaneous rapid growth in PPP use in previously low-use provinces — particularly Adıyaman and Diyarbakır — while the historically dominant Şanlıurfa showed high interannual volatility without a significant upward trend. The trend toward reduced spatial

concentration therefore does not indicate an absolute reduction in PPP use, but rather a spatial redistribution of pesticide pressure within the region.

3.5. Provincial Cluster Classification

Based on average annual PPP use and Mann–Kendall trend results, the nine GAP provinces were classified into three functional clusters (Table 4). The high-use cluster (Şanlıurfa, Diyarbakır, Gaziantep) is characterized by average annual use above 700 thousand kg-L, dominance of herbicides and insecticides, and association with intensive irrigated cotton, cereal, and horticultural production. The medium-use cluster (Adıyaman, Mardin), with average use between 500 and 550 thousand kg-L, both show statistically significant increasing trends ($p < 0.05$), reflecting ongoing agricultural intensification driven by expanding irrigation. The low-use cluster (Batman, Kilis, Şırnak, Siirt) exhibits absolute use below 100 thousand kg-L but includes two provinces (Kilis and Siirt) with statistically significant upward trends, suggesting the early stage of intensification pressure.

Table 4. Provincial cluster classification based on average annual PPP use and Mann–Kendall trend results.

Cluster	Provinces	Avg. PPP Use (thousand kg-L)	Dominant PPP Group	MK Trend	Main Agricultural System
High-use	Şanlıurfa, Diyarbakır, Gaziantep	999	Herbicides / Insecticides	Mixed (Diyarbakır: **)	Intensive irrigated cotton, cereals, horticulture
Medium-use	Adıyaman, Mardin	526	Herbicides	Increasing (**/*)	Expanding irrigated field crops, olives
Low-use	Batman, Kilis, Şırnak, Siirt	42	Herbicides / Fungicides	Kilis *, Siirt **	Rain-fed cereals, olives, orchards

Note. Significance codes: ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$. Average PPP use is the mean across 2016–2024 in thousand kg-L. Dominant PPP group refers to the pesticide category with the consistently highest proportional share.

4. Discussion

4.1. The Şanlıurfa Anomaly: Interpreting High Variability Without Trend

A finding of particular interpretive importance is the absence of a statistically significant temporal trend in Şanlıurfa despite its position as the consistently dominant contributor to regional PPP use. The province's sharp decline from 2,547 thousand kg-L in 2016 to 691 thousand kg-L in 2021 — a 73% reduction within five years — followed by partial recovery in 2022–2023, cannot be attributed to random fluctuation and warrants explicit interpretation. Several non-exclusive explanations may be advanced. First, the period 2019–2021 corresponded to a significant contraction in Türkiye's cotton production driven by adverse price conditions, rising input costs, and policy shifts affecting planted area, which would directly reduce insecticide and herbicide demand in cotton-intensive Şanlıurfa (Tiryaki et al., 2010). Second, the exceptional drought that affected the GAP region during 2021, reducing irrigation water availability from the Atatürk reservoir system, would have directly curtailed irrigated crop area and associated pesticide inputs. Third, reporting methodology changes between survey years cannot be entirely excluded as a contributing factor to observed discontinuities. Future studies should integrate crop area and irrigation water delivery data to formally decompose this variability into structural and conjunctural components.

4.2. The Emerging Second Wave: Provinces with Significant Increasing Trends

The most policy-relevant finding of this study is the consistent identification of statistically significant increasing trends in five provinces — Diyarbakır, Adıyaman, Mardin, Kilis, and Siirt — that represent different stages of agricultural intensification within the GAP framework. Diyarbakır and Adıyaman, both with $\text{Tau} = 0.722$ and $p = 0.009$, are experiencing rapid expansion of irrigated agriculture in their respective plains; Adıyaman's fivefold increase in PPP use over the study period closely parallels the commissioning of new irrigation schemes under the Göksu-Araban and Adıyaman-Kâhta components of the GAP master plan. This trajectory is consistent with evidence from other irrigation-driven agricultural transformations where PPP use intensification follows infrastructure investment with a lag of several years as farmers adopt new cropping systems (Tilman et al., 2011; Zhang et al., 2018; Yercan & Atış, 2019).

Kilis and Siirt present a distinct case: both provinces exhibit statistically significant increasing trends ($p < 0.05$) despite very low absolute PPP quantities (averages of 28 and 31 thousand kg-L, respectively). In Kilis, this reflects incremental intensification of pistachio and olive orchard management — crops increasingly managed with foliar fungicides and insecticide applications as market-oriented production displaces traditional low-input practices (Tiryaki et al., 2010). In Siirt, expansion of pomegranate and pistachio orchards in irrigable valleys is a plausible driver. Siirt's exceptionally high Kendall's τ (0.889, $p = 0.001$) — the strongest monotonic relationship of any province in the dataset — indicates a highly consistent year-on-year increase, a statistical profile associated with structurally driven rather than episodic change. These low-use provinces with significant trends represent precisely the intervention points emphasized in preventive IPM frameworks, where establishing monitoring and advisory infrastructure before dependency becomes entrenched is most cost-effective (Pretty & Bharucha, 2015; FAO, 2022).

4.3. Compositional Shifts: From Herbicide Dominance Toward a Fungicide-Insecticide Mix

The dominance of herbicides throughout the study period is consistent with the structural characteristics of the GAP region's major irrigated cropping systems. Large-scale monoculture production of cotton, wheat, maize, and soybean under mechanized irrigated conditions is strongly associated with chemical weed control as the primary weed management strategy (Carvalho, 2017; Lechenet et al., 2017). The warm semi-arid climate of the region supports rapid weed establishment following each irrigation event, reinforcing herbicide demand across growing seasons.

The marginally significant declining tendency in herbicide share ($p = 0.076$) and the concurrent statistically significant absolute increase in fungicide use ($p = 0.029$) together suggest a genuine compositional transition in the regional PPP mix. This shift is mechanistically plausible: as irrigated cropping systems mature and diversify — incorporating vegetables, legumes, stone fruits, and pomegranate as cash crops alongside the traditional cotton-wheat rotation — disease management requirements increase substantially. Irrigated canopy conditions elevate relative humidity at the crop level, creating microenvironments conducive to foliar fungal pathogens such as *Botrytis cinerea*, *Alternaria* spp., and *Phytophthora* spp. (Lamichhane et al., 2016). The anomalous spike in insecticide share observed in 2022 (36.9%) likely reflects a combination of expanded cotton area and intensified sucking pest pressure, particularly whitefly (*Bemisia tabaci* Gennadius) and bollworm infestations, consistent with the pattern of secondary pest outbreaks following disruption of natural enemy populations by broad-spectrum insecticide applications (Carvalho, 2017; IPBES, 2019).

4.4. Declining Spatial Concentration: Redistribution, Not Reduction

The statistically significant decline in the Gini index ($Z = -1.981$, $p = 0.048$) over the study period documents a gradual redistribution of PPP use across the nine provinces — from a situation of extreme concentration (Gini = 0.687 in 2016, with three provinces accounting for 86.9% of regional use) toward a more even distribution (Gini = 0.503 in 2024, top-3 share = 69.0%). This trend is driven primarily by the rapid growth of PPP use in Adıyaman and Diyarbakır rather than by any reduction in the absolute use of the high-use provinces. It therefore represents a spatial diffusion of pesticide pressure rather than a genuine sustainability improvement. From a monitoring and governance perspective, this redistribution implies that environmental risk assessment frameworks for the GAP region must increasingly incorporate the formerly peripheral provinces, which are now approaching pesticide use

levels associated with significant environmental and health exposure risks in the established literature (IPBES, 2019; Böcker & Finger, 2016).

4.5. Implications for Integrated Pest Management in the GAP Region

The spatiotemporal patterns documented in this study carry direct implications for IPM policy and extension practice in the GAP region. The cluster-based differentiation of provinces into high-use (stable or variable), medium-use (significantly increasing), and low-use (significantly increasing) trajectories calls for correspondingly differentiated IPM strategies rather than uniform regional approaches (Pretty & Bharucha, 2015; FAO, 2022).

For the high-use cluster (Şanlıurfa, Diyarbakır, Gaziantep), the priority is reduction of existing pesticide dependency through the strengthening of decision support systems (DSS) for spray timing and threshold-based application, promotion of biological control agents for key cotton and vegetable pests, and enhanced resistance monitoring programs for herbicides in monoculture rotation systems. For the medium-use cluster (Adıyaman, Mardin), the most important intervention is to establish IPM advisory infrastructure concurrently with irrigation expansion — ensuring that new farmers entering irrigated production adopt threshold-based practices from the outset rather than default to calendar-based spray programs. The low-use cluster, particularly Kilis and Siirt, requires early-stage capacity building in orchard IPM as intensification proceeds.

The increasing share of fungicides in the regional PPP mix merits specific attention. While fungicide use is often considered less environmentally hazardous than insecticides, sustained intensive fungicide applications raise concerns regarding development of fungicide resistance in pathogen populations — a well-documented phenomenon in Turkish viticulture and vegetable production (Lamichhane et al., 2016). Disease-resistant cultivar adoption, improved crop rotation, and microclimatic canopy management represent cost-effective alternatives to fungicide intensification in irrigated systems.

4.6. Limitations and Future Research Directions

Several limitations of this study should be acknowledged. First, the analysis is based on provincially aggregated administrative data, which do not capture within-province spatial heterogeneity in PPP use, crop-specific application rates, or farm-level practice diversity. Spatially explicit linkage of PPP use statistics with crop area maps — available at sub-provincial resolution from TÜİK — would enable calculation of use-intensity indicators (kg-L ha^{-1}) that would facilitate comparison across provinces of different agricultural size and allow more direct attribution of trends to specific cropping systems. Second, the nine-year temporal scope, while sufficient for Mann–Kendall trend detection at the 5% level, remains relatively short for robust trend estimation in the presence of high interannual variability (particularly for Şanlıurfa). Extension of the temporal series as annual data become available will strengthen the statistical foundation of trend conclusions. Third, the absence of a verified spatial weight matrix for the nine GAP provinces precluded formal spatial autocorrelation analysis (e.g., Moran's I, Getis-Ord G_i^*), which would have allowed rigorous testing of spatial clustering in PPP use. Future studies should incorporate formal geostatistical methods using georeferenced agricultural boundary data. Fourth, linking PPP use trends to environmental outcomes — residue levels in soil and water, pollinator exposure risks, and ecosystem service impacts — requires integration of monitoring data beyond the scope of the present statistical analysis.

5. Conclusions

This study provides the first comprehensive spatiotemporal assessment of plant protection product use across all nine provinces of Türkiye's GAP region for the period 2016–2024, integrating non-parametric trend analysis, spatial concentration metrics, and functional provincial classification. The key findings are as follows.

(1) Total regional PPP use exhibited no statistically significant monotonic trend at the aggregate level, primarily because the dominant province (Şanlıurfa) showed high interannual variability without a clear directional trend. This finding cautions against inferring regional trajectories from aggregate statistics alone.

(2) At the provincial scale, statistically significant increasing trends were detected in five provinces — Diyarbakır, Adıyaman, Mardin, Kilis, and Siirt — all of which are experiencing ongoing agricultural intensification linked to irrigation development. These provinces represent the emerging frontline of PPP intensification in the GAP region.

(3) Fungicide use increased significantly in absolute terms ($Z = 2.189$, $p = 0.029$), and herbicide proportional share showed a marginally declining tendency, together indicating a structural compositional shift in the regional PPP mix toward disease management oriented inputs.

(4) Spatial concentration of PPP use, while consistently high (Gini: 0.445–0.687), showed a statistically significant declining trend ($Z = -1.981$, $p = 0.048$), reflecting spatial redistribution of pesticide pressure rather than overall reduction.

(5) A functional classification of provinces into high-, medium-, and low-use clusters provides a practical framework for designing spatially differentiated IPM interventions tailored to the distinct agricultural systems and intensification trajectories of each cluster.

Collectively, these findings underscore the critical importance of province-scale, long-term monitoring of pesticide use as a foundation for evidence-based pest management policy in rapidly transforming agricultural regions. The GAP region, with its ongoing irrigation development and intensifying cropping systems, requires proactive, spatially differentiated IPM strategies — particularly in provinces currently in the early stages of intensification, where the opportunity to establish sustainable practices before chemical dependency becomes entrenched is greatest.

References

- Böcker, T., & Finger, R. (2016). European pesticide tax schemes in comparison: An analysis of key design options and potential impacts. *Ecological Economics*, 124, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.01.006>
- Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2), 48–60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- FAO. (2022). World food and agriculture — Statistical yearbook 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- GAP Regional Development Administration. (2023). GAP master plan update: Progress and projections. Republic of Türkiye GAP İdaresi.
- Hussain, M. M., & Mahmud, I. (2019). pyMannKendall: A Python package for non-parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, 4(39), 1556. <https://doi.org/10.21105/joss.01556>
- İnan, H., & Boyraz, N. (2003). Evaluation of agrochemical dealers in Konya province in terms of some aspects. *Selçuk University Journal of the Faculty of Agriculture*, 17(32), 86–97.
- IPBES. (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- Kaya, M. (2006). Sulama projelerinin tarım sektörüne etkileri: GAP örneği. Türkiye Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi, Ankara.
- Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). Charles Griffin.
- Kışlalıoğlu, M., & Berkes, F. (1985). Ekoloji ve çevre bilimleri. Remzi Kitabevi.
- Lamichhane, J. R., Barzman, M., Booij, K., Boonekamp, P., Desneux, N., Huber, L., Kudsk, P., Langrell, S. R. H., Ratnadass, A., Ricci, P., Sarah, J.-L., & Messéan, A. (2015). Robust cropping systems to tackle pests under climate change. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 443–459. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0275-9>
- Lechenet, M., Dessaint, F., Py, G., Makowski, D., & Munier-Jolain, N. (2017). Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants*, 3, 17008. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Ministry of Agriculture and Forestry of the Republic of Türkiye. (2016–2024). İl düzeyinde bitki koruma ürünlerinin kullanım miktarları [Amounts of use of plant protection products at provincial level]. Tarım ve Orman Bakanlığı. <https://www.tarimorman.gov.tr>
- Pohlert, T. (2023). trend: Non-parametric trend tests and change-point detection. R package version 1.1.6. <https://CRAN.R-project.org/package=trend>
- Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 243–255. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x>

- Pretty, J., & Bharucha, Z. P. (2015). Integrated pest management for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa. *Insects*, 6(1), 152–182. <https://doi.org/10.3390/insects6010152>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 53, 386–392.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tiryaki, O., Canhilal, R., & Horuz, S. (2010). The use of agricultural pesticides and their risks. *Erciyes University Journal of the Institute of Science and Technology*, 26(2), 154–169.
- Tiryaki, O., & Canhilal, R. (2011). Bioassay and biochemical mechanisms of resistance in populations of the two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae* Koch) from a cotton-growing area in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 35, 101–110.
- Turabi, M. S. (2007). Licensing of plant protection products. In *Proceedings of the Agricultural Pesticides Congress and Exhibition* (pp. 50–61). TMMOB Chamber of Agricultural Engineers.
- Ünver, İ. H. O. (1997). Southeastern Anatolia project (GAP). *Water Resources Development*, 13(4), 453–483. <https://doi.org/10.1080/07900629749547>
- Yercan, M., & Atış, E. (2019). Irrigation development and agricultural sustainability in Türkiye: Lessons from the GAP experience. *Water Resources Management*, 33(1), 295–310.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16(9), 1807–1829. <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>
- Zhang, W., Jiang, F., & Ou, J. (2018). Global pesticide consumption and pollution: With China as a focus. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 8(2), 74–84.

TOXIC EFFECTS OF SOME PESTICIDES ON THE EGGS OF *Nabis pseudoferus orientarius*
Remane, 1962 (HEMIPTERA: NABIDAE)

Muhlis SEZGİN, Ph.D.

Diyarbakır Plant Protection Research Institute Directorate, Diyarbakır-Türkiye

Email: muhlis.sezgin@tarimorman.gov.tr, m.sezgin1907@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4936-4169>

Ozan AKAT, Ph.D

Ministry of Agriculture and Forestry, Diyarbakır Provincial Directorate of Agriculture and Forestry,
Plant Protection Department, Diyarbakır-Türkiye

Email: akatozan21@gmail.com , ozan.akat@tarimorman.gov.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1280-2321>

Merve AKYILDIZ, Ph.D.

Diyarbakır Plant Protection Research Institute Directorate, Diyarbakır-Türkiye

Email: merve.akyildiz@tarimorman.gov.tr, gokdemirmrv@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4936-4169>

Prof. Selime ÖLMEZ BAYHAN

Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Plant Protection, Diyarbakır-Türkiye

Email: : solmezbayhan@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2285-6518>

Prof. Erol BAYHAN

Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Plant Protection, Diyarbakır-Türkiye

Email: akatozan21@gmail.com , ozan.akat@tarimorman.gov.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7579-586X>

Abstract

Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) production areas are inhabited by numerous insect pest species that inflict significant losses in both yield and fiber quality. Although pesticides remain the primary tool for pest management, their indiscriminate use poses serious risks to natural enemies that underpin biological control programs. *Nabis* spp. (Hemiptera: Nabidae) are generalist predatory bugs that prey on a broad spectrum of soft-bodied pest species in cotton fields. The present study evaluated the ovicidal activity of five registered pesticides and one standard toxicant against *Nabis pseudoferus orientarius* Remane, 1962 under laboratory conditions using the immersion method. At 72 hours post-application, emamectin benzoate produced the highest percent effect (91.17%) and was classified as harmful (T) to eggs based on IOBC criteria. In contrast, hexythiazox (20.62%), chlorantraniliprole (13.28%), acetamiprid (12.77%), and sulfoxaflor (11.72%) were all classified as harmless (N), indicating their compatibility with biological control involving this predator.

Keywords: Biological control, Cotton, Immersion method, IOBC, Natural enemy, Ovicidal activity, Side effects

1. Introduction

Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) is one of the world's most economically significant industrial crops, with applications spanning the textile, vegetable oil, and livestock feed industries. China, India, the United States, Brazil, and Pakistan dominate global production, while China, India, Pakistan, Bangladesh, and Turkey account for the largest shares of consumption. Turkey holds a prominent position in the global cotton market, ranking sixth in production volume, eleventh in cultivated area, second in fiber yield per unit area, and sixth in imports (Anonymous, 2019).

Cotton production is threatened by a diverse complex of pest insects that can cause substantial losses in both yield and quality, leading growers to rely heavily on pesticide applications as the principal control measure. While these chemicals are often indispensable, their repeated use in cotton systems can exert direct and indirect adverse effects on the predatory arthropods that constitute the backbone of biological control, raising concerns for long-term sustainability and ecological balance.

A number of studies conducted in the Southeastern Anatolia Region of Turkey have documented the widespread occurrence of predatory arthropods in cotton fields, including *Chrysoperla carnea* Steph., *Orius* spp., *Nabis* spp., *Deraeocoris* spp., *Geocoris* spp., *Campylomma diversicornis* Reut., and *Aelothrips collaris* (Önder and Lodos, 1987; Göven and Efil, 1994; Büyük et al., 2002). In Diyarbakır province specifically, the dominant predatory species identified include *Nabis pseudoferus* Rem., *N. rugosus* L., *Geocoris pallidipennis* (C.), and *Chrysoperla carnea* (Steph.) (Anonymous, 2022). Surveys across Şanlıurfa, Diyarbakır, and Mardin provinces further confirmed the presence of *Nabis pseudoferus orientarius* Remane, 1962, *N. punctatus*, and *N. ferus* (Hemiptera: Nabidae) as resident predators in regional cotton production areas (Sezgin and Ölmez Bayhan, 2023).

Nabis species are highly effective generalist predators that feed on the adults, larvae, and eggs of a wide range of soft-bodied pests, including leafworms, aphids, spider mites, and moths. *Nabis ferus* (L.) has been reported to consume 450–600 aphids over its lifetime, and *N. pseudoferus* Rem. has been shown to be particularly effective against Noctuidae (Lepidoptera) species causing damage to cotton in the Southeastern Anatolia Region (Anonymous, 2020). Comprehensive life history analyses of *N. pseudoferus orientarius* under laboratory conditions have revealed a high reproductive potential: a single female produces an average of 446.1 eggs (range: 267–576) over her lifetime, with a mean egg hatching time of 9.83 days, a preadult development period of 26.85 days, and a mean adult lifespan of 62.6 days including a 58.5-day oviposition period (Sezgin et al., 2026). Population growth analyses further underscore the species' capacity for rapid increase, with an intrinsic rate of increase (r) of 9.15 day⁻¹, a net reproductive rate (R^0) of 193.13 females/female, and a population doubling time (DT) of 7.58 days (Sezgin et al., 2026).

Pesticides can affect natural enemies not only directly through acute toxicity, but also indirectly by impairing physiological and behavioral parameters such as longevity, fecundity, reproductive output, and foraging efficiency. The magnitude of these effects is known to vary with pesticide concentration, predator species identity, and the nature of exposure (Cloyd, 2012). Given the intensive pesticide use in cotton systems and the critical role of *Nabis* species in regulating pest populations, it is essential to assess the compatibility of commonly used insecticides with this predator.

The objective of this study was to determine the toxic effects of pesticides registered for use against cotton pests in Turkey on the eggs of *N. pseudoferus orientarius*, using the immersion method under controlled laboratory conditions. The results are intended to support evidence-based IPM decision-making and to contribute to the conservation of this important natural enemy in cotton production areas of the Southeastern Anatolia Region.

2. Materials and Methods

2.1. Production of Kalanchoe Plants

Kalanchoe blossfeldiana plants, used as the oviposition substrate for *N. pseudoferus orientarius*, were cultivated in 21-litre pots (diameter: 40 cm; height: 31 cm) containing a 1:1 (v/v) soil-to-peat mixture in a fully automated greenhouse maintained at 24 ± 2 °C and 40 ± 5% relative humidity. To ensure a continuous supply of fresh plant material throughout the experimental period, stem cuttings bearing 3–5 leaf nodes were regularly propagated.

2.2. Rearing of *Ephestia kuehniella*

Ephestia kuehniella Zeller, 1879 (Lepidoptera: Pyralidae) was mass-reared in a climate chamber maintained at 25 ± 1 °C, $65 \pm 5\%$ RH, and a photoperiod of 16:8 h (L:D). The rearing medium consisted of a 1:1 (w/w) mixture of wheat flour and coarse wheat bran provided in plastic trays sealed with gauze cloth on both sides (Sezgin, 2023).

2.3. Rearing of *Nabis pseudoferus orientarius*

N. pseudoferus orientarius was maintained in a climate chamber at 25 ± 1 °C, $65 \pm 5\%$ RH, and a photoperiod of 16:8 h (L:D). Adult pairs (one female and one male) were housed individually in plastic containers (approximately 100 ml) covered with gauze and supplied daily with *E. kuehniella* eggs presented on 1×2 cm² strips of thin tracing paper. *Kalanchoe* leaves were included in each container as oviposition substrates. All bioassays were initiated after one complete laboratory generation had been obtained (Sezgin, 2023; Sezgin et al., 2026).

2.4. Pesticide Application to Eggs

Adult pairs of *N. pseudoferus orientarius* were placed in gauze-covered containers together with *Kalanchoe* leaves for a 24-hour oviposition period. Leaves were subsequently examined under a stereomicroscope, assigned unique identification numbers, and characterized by egg count and oviposition date. Pesticide solutions were prepared at the registered field rate in 0.5 L of distilled water. Each egg-bearing leaf was immersed in the corresponding solution for 5 seconds, air-dried for approximately one hour at room temperature, and transferred to individual containers in a climate chamber (25 ± 1 °C, $65 \pm 5\%$ RH, 16:8 h L:D). Nymph emergence was monitored through daily observations for the duration of the emergence period.

Working doses were established through preliminary dose-finding trials in which first- and second-instar nymphs were exposed to pesticide residual films (10 individuals per treatment); concentrations producing 30–90% mortality were selected for use in the main experiment (Table 1). The standard toxicant dimethoate, which caused 100% mortality in nymphs at its registered rate, was applied at a sub-lethal dose of 0.0312 ml/da. All solutions were prepared using distilled water, calibrated micropipettes, and a precision analytical balance (Sezgin, 2023).

The experiment was arranged in a completely randomized design comprising seven treatments (six pesticides and one untreated control) with four replicates each; each replicate consisted of one *Kalanchoe* leaf bearing naturally deposited eggs.

Table 1. Pesticides evaluated in the study, working doses, registered target pests, and mode of action

Active Ingredient	Registered Dose	Working Dose	Registered Pests	Target	MOA Group / Mode of Action
Emamectin benzoate 5% SG	40 g/da	0.8 g	H. armigera, S. littoralis		Gr. 6 – GluCl allosteric modulator; stomach/contact
Chlorantraniliprole 200 g/L SC	17.5 ml/da	0.35 ml	E. insulana, H. armigera, S. littoralis		Gr. 28 – Diamide; ryanodine receptor modulator; systemic/translaminar
Acetamiprid 20% SP	10 g/da	0.2 g	B. tabaci, E. decipiens, A. decedens		Gr. 4A – Neonicotinoid; nAChR competitive modulator; systemic/contact/translaminar
Sulfoxaflor 50% WG	15 g/da	0.3 g	Lygus spp., E. gemallatus, C. pallidus		Gr. 4C – Sulfoximine; nAChR competitive modulator; systemic/translaminar
Hexythiazox 50 g/L EC	75 ml/da	1.5 ml	T. urticae, T. cinnabarinus		Gr. 10A – Mite growth regulator; contact
Dimethoate (standard toxicant)	100 ml/da	0.0312 ml	—		Gr. 1B – Organophosphate

2.5. Data Analysis

Percentage egg mortality was corrected for natural mortality in the control using Abbott's formula (Abbott, 1925). Prior to analysis, arcsine square-root transformation was applied to percentage values; one-way ANOVA was performed and treatment means were compared using Tukey's HSD test (SPSS; Güven and Göven, 2003; Portakaldalı and Satar, 2015). Percent effect values were classified according to IOBC selectivity criteria: < 30% = harmless (N), 30–79% = slightly harmful (M), ≥ 80% = harmful (T) (Boller et al., 2006).

3. Results

The percent effects (Abbott-corrected), mean nymph emergence rates, and egg hatching times recorded following pesticide application to *N. pseudoferus orientarius* eggs are summarized in Tables 2 and 3. Among all treatments, emamectin benzoate produced the highest ovicidal activity (91.17%), corresponding to a mean arcsine-transformed value of 75.97 ± 12.35 and a nymph emergence rate of only 4.85%. This compound was classified as harmful (T) under IOBC criteria and formed a statistically distinct group from all other treatments (Tukey HSD; $F = 13.38$, $p = 0.000$). All remaining compounds—dimethoate (25.88%), hexythiazox (20.62%), chlorantraniliprole (13.28%), acetamiprid (12.77%), and sulfoxaflor (11.72%)—were classified as harmless (N) and grouped together statistically. Mean nymph emergence rates for these compounds ranged from 47.40% (dimethoate) to 60.83% (sulfoxaflor), compared with 69.00% in the untreated control.

Table 2. Abbott-corrected percent effect values and statistical comparisons following pesticide application to *N. pseudoferus orientarius* eggs.

Pesticide	Mean $\pm$ SD (arcsine-transformed)	Min.– Max.	Mean Nymph Emergence (%)	Abbott Effect (%)	IOBC Class
Emamectin benzoate	75.97 ± 12.35 a	60.00– 90.00	4.85	91.17	T (Harmful)
Chlorantraniliprole	20.50 ± 7.75 b	12.47– 29.67	59.30	13.28	N (Harmless)
Acetamiprid	20.94 ± 5.99 b	13.01– 25.58	60.44	12.77	N (Harmless)
Sulfoxaflor	16.79 ± 13.39 b	2.63– 29.29	60.83	11.72	N (Harmless)
Hexythiazox	26.33 ± 8.32 b	18.68– 34.56	54.12	20.62	N (Harmless)
Dimethoate	27.12 ± 19.76 b	7.27– 45.04	47.40	25.88	N (Harmless)
Control (distilled water)	—	—	69.00	—	—
* Different letters in the same column denote statistically significant differences (Tukey HSD; $F = 13.38$, $p = 0.000$)					

With respect to nymph emergence counts per leaf, emamectin benzoate again yielded the lowest value (mean: 1.25 nymphs/leaf), placing it in a statistically separate group from all other treatments ($F = 2.89$, $p = 0.033$); the highest emergence was recorded in the untreated control (mean: 18.00 nymphs/leaf). Regarding egg hatching duration, dimethoate-treated eggs exhibited the shortest incubation period (mean: 8 days), which differed significantly from the remaining groups ($F = 13.00$, $p = 0.000$). Eggs treated with chlorantraniliprole and acetamiprid required a mean of 9 days to hatch, while those in the control, emamectin benzoate, and sulfoxaflor groups all averaged 10 days.

Table 3. Nymph emergence counts and egg incubation durations following pesticide application to *N. pseudoferus orientarius* eggs

Pesticide	No. Leaves	Mean Eggs / Leaf*	Mean Nymphs / Leaf**	Mean Egg Hatching Time (days)***	Stat. Group
Emamectin benzoate	4	23.00	1.25 b	10 a	b
Chlorantraniliprole	4	27.25	16.00 ab	9 ab	ab
Acetamiprid	4	23.00	14.50 ab	9 ab	ab
Sulfoxaflor	4	13.25	6.75 ab	10 a	ab
Hexythiazox	4	20.25	11.00 ab	10 a	ab
Dimethoate	4	20.25	10.50 ab	8 b	a
Control	4	26.75	18.00 a	10 a	ab
* F = 1.26, P = 0.319 (ns) ** F = 2.89, P = 0.033 *** F = 13.00, P = 0.000					

4. Discussion

The present study demonstrates that emamectin benzoate poses the greatest risk to *N. pseudoferus orientarius* eggs among the compounds evaluated, with an ovicidal effect of 91.17% placing it in the IOBC 'harmful' (T) category. These findings are consistent with those of Horne et al. (2009), who reported that direct application of emamectin benzoate was harmful to *Nabis kinbergii*, and with Shan et al. (2020), who documented high acute toxicity of this compound toward *Chrysoperla sinica* Tjeder ($LC^{50} = 7.41$ mg/L). Taken together, these results suggest that emamectin benzoate exhibits broad-spectrum toxicity to beneficial arthropods across different taxonomic groups. The pattern observed here for emamectin benzoate contrasts to some extent with earlier nymphal toxicity data for the same species. Sezgin (2023) reported, using the residual film method on first- and second-instar nymphs of *N. pseudoferus orientarius*, that both dimethoate (mean dead nymphs: 5.25) and emamectin benzoate (4.00) were the most toxic compounds, yet were classified as only moderately harmful (M) under IOBC criteria. The higher ovicidal (91.17%) compared to moderate nymphal toxicity observed across these studies points to differential susceptibility across life stages—a phenomenon with important practical implications for the timing of pesticide applications relative to the presence of egg masses in the field. The ecological importance of preserving egg viability in *N. pseudoferus orientarius* populations cannot be overstated. As demonstrated by Sezgin et al. (2026), females of this species exhibit a remarkable reproductive potential, producing an average of 446.1 eggs per lifetime and achieving a net reproductive rate (R^0) of 193.13 females/female with a population doubling time of only 7.58 days. Even a partial suppression of egg hatching by emamectin benzoate—as observed in the present study—could therefore significantly disrupt natural enemy population dynamics and diminish biological control efficacy during critical crop growth stages. An instructive contrast is provided by a parallel study on *Geocoris megacephalus* (Akyıldız, 2023), in which dimethoate caused the highest nymphal mortality (91%), followed by acetamiprid (79%), sulfoxaflor (68%), and hexythiazox (50%), while emamectin benzoate was classified as harmless (15%). The divergence between these results and those of the present study underscores the species-specific nature of pesticide side effects and reinforces the need for life-stage-specific risk assessments for each natural enemy targeted for conservation in IPM programs.

5. Conclusions

Of the pesticides tested against *N. pseudoferus orientarius* eggs using the immersion method, emamectin benzoate was the only compound classified as harmful (T) according to IOBC selectivity criteria, producing a 91.17% ovicidal effect and reducing mean nymph emergence to just 4.85%. It also

yielded the lowest nymph count per leaf (mean: 1.25), statistically distinct from all other treatments. The remaining compounds—hexythiazox (20.62%), chlorantraniliprole (13.28%), acetamiprid (12.77%), sulfoxaflor (11.72%), and dimethoate at a sub-lethal dose (25.88%)—were all classified as harmless (N) and are therefore considered compatible with the egg stage of this predator.

Given the high reproductive potential of *N. pseudoferus orientarius* (Sezgin et al., 2026) and the critical role it plays in suppressing insect pest populations in cotton, it is strongly recommended that applications of emamectin benzoate in cotton fields be avoided or minimized whenever natural enemy populations are present. Preferential use of selective insecticides that demonstrate compatibility with *Nabis* species will contribute to the conservation and enhancement of natural enemy populations, thereby strengthening biological control and reducing dependence on broad-spectrum pesticides in the cotton production areas of Southeastern Anatolia.

References

- Abbott W.S. (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18: 265–267.
- Akyıldız M. (2023) Determination of *Geocoris* spp. (Hemiptera: Geocoridae) species in cotton production areas of the Southeastern Anatolia Region, biological parameters of the key species, and side effects of commonly used insecticides under laboratory conditions. PhD Thesis, Dicle University, Institute of Natural and Applied Sciences.
- Anonymous (2019) Cotton Report 2018. Ministry of Trade, General Directorate of Tradesmen, Artisans and Cooperatives (accessed 20 December 2022).
- Anonymous (2020) Damsel Bugs Beneficials – Ontario Crop IPM. <http://www.omafra.gov.on.ca/IPM/english/beneficials/gallery/damsel-bugs.html> (accessed 03 September 2022).
- Anonymous (2022) Cotton Integrated Pest Management Technical Guidelines. Ministry of Agriculture and Forestry, General Directorate of Agricultural Research and Policies (accessed 20 April 2022).
- Boller E.F., Vogt H., Ternes P. and Malavolta C. (2006) Working document on selectivity of pesticides. IOBC/WPRS Working Group 'Pesticides and Beneficial Organisms', Issue No. 40.
- Büyük M., Eren S., Baran B. and Demir A. (2002) Current pest management problems and proposed solutions in GAP Region cotton production. *Proceedings of the 5th Turkey Cotton, Textile and Garment Symposium*, 28–29 April, Diyarbakır, pp. 177–185.
- Cloyd R.A. (2012) Indirect effects of pesticides on natural enemies. DOI: 10.5772/48649.
- Göven M.A. and Efil L. (1994) Natural enemies of *Heliothis armigera* Hübn. (Lepidoptera: Noctuidae) and their efficacy in the Dicle Valley. *Proceedings of the 3rd Biological Control Congress*, 25–28 January, İzmir, pp. 449–457.
- Güven B. and Göven M.A. (2003) Side effects of pesticides used in cotton and vineyard areas of the Aegean Region on the green lacewing, *Chrysoperla carnea* (Steph.) (Neuroptera: Chrysopidae), in the laboratory.
- Horne P., Cole P. and Cutler A. (2009) Pesticide effects on beneficial insects and mites in vegetables. IPM Technologies Pty Ltd. HAL Project VG06087.
- Önder F. and Lodos N. (1987) A general review of predatory Heteroptera species in Turkey. *Turkish Journal of Entomology*, 11(2): 117–125.
- Portakaldalı M. and Satar S. (2015) Effects of some pesticides on the predatory bug *Nesidiocoris tenuis* Reuter (Hemiptera: Miridae) under laboratory conditions. *Turkish Bulletin of Entomology*, 5(4): 209–216.
- Sezgin M. (2023) Identification of *Nabis* (Hemiptera: Nabidae) species in cotton production areas of Diyarbakır, Mardin, and Şanlıurfa provinces, biological characteristics of the key species, and determination of toxic effects of some pesticides. PhD Thesis, Dicle University, Institute of Natural and Applied Sciences.
- Sezgin M. and Ölmez Bayhan S. (2023) *Nabis* species (Hemiptera: Nabidae) identified in cotton production areas of Şanlıurfa, Diyarbakır, and Mardin provinces. *Journal of Dicle University Institute of Science and Technology (DUFED)*, 12(1): 139–146. <https://doi.org/10.55007/dufed.1278104>

**ÜRETKEN TASARIM YÖNTEMİYLE OLUŞTURULAN FARKLI FDM TASARIMLARININ
ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ ODAKLI ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
PERFORMANSININ AHP TABANLI DEĞERLENDİRMESİ**

Sezer Barış YILDIRIMER

Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul-Türkiye

E-Posta: sezerbariis@yahoo.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-2194-6616>

Doç. Dr. Ahmet FEYZİOĞLU

Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul-Türkiye

E-Posta: ahmet.feyzioglu@marmara.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0296-106X>

Dr. Hüseyin HALİLOĞLU

Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul-Türkiye

E-Posta: huseyinhaliloglu@marun.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7555-4492>

Özet

Bu çalışma, Eriyik Yığma Modelleme (EYM) ile üretilen çok rotorlu İHA motor bağlantı aparatında üretken tasarım stratejilerinin çevresel sürdürülebilirlik, malzeme kullanımı, kütle azaltımı ve mekanik performans üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Bu amaçla geleneksel referans model A0 ile kabuk-dominant, iskelet-dominant ve hibrit yapıdaki A1, A2 ve A3 üretken tasarım alternatifleri karşılaştırılmıştır. Numuneler aynı yazıcı, PLA malzeme ve sabit baskı parametreleri kullanılarak her bir tasarım için dört tekrarlı olarak üretilmiştir. Deneysel süreçte enerji tüketimi, baskı süresi, nihai parça kütlesi, destek/atık malzeme miktarı ve karbon eşdeğeri emisyon değerleri ölçülmüş; özgül enerji tüketimi hesaplanmıştır. Mekanik yeterlilik statik analizlerle, karar modelindeki rijitlik göstergesi ise belirli yük altında ölçülen z-yönlü deplasman değeriyle değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları Bulanık AHP yöntemiyle belirlenmiş, tasarım alternatifleri TOPSIS yaklaşımıyla sıralanmıştır. Endüstriyel simbiyoz yaklaşımı, destek ve atık filament miktarının kaynak döngüsellliği ve yeniden kullanım potansiyeli açısından ele alınmasıyla karar modeline dâhil edilmiştir. Bulgular, üretken tasarım stratejilerinin geleneksel modele kıyasla kütle, destek/atık oluşumu, enerji tüketimi ve karbon eşdeğeri emisyonu bakımından iyileştirme potansiyeli sunduğunu; ancak bu kazanımların rijitlik davranışı ve özgül enerji tüketimi açısından varyanta bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Çalışma, EYM süreçlerinde tasarım odaklı sürdürülebilirlik değerlendirmesi için deneysel ölçüm, mekanik doğrulama ve çok kriterli karar verme yöntemlerini bütünleştiren izlenebilir bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eriyik Yığma Modelleme, üretken tasarım, sürdürülebilirlik, Bulanık AHP, TOPSIS, karbon eşdeğeri

**AHP-BASED EVALUATION OF THE INDUSTRIAL SYMBIOSIS-ORIENTED
ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY PERFORMANCE OF DIFFERENT FDM DESIGNS
GENERATED BY THE GENERATIVE DESIGN METHOD**

Abstract

This study evaluates the effects of generative design strategies on environmental sustainability, material use, mass reduction, and mechanical performance in a multicopter UAV motor mounting bracket produced by Fused Deposition Modeling (FDM). For this purpose, the conventional reference model A0 was compared with the shell-dominant, skeleton-dominant, and hybrid generative design alternatives A1, A2, and A3. The specimens were manufactured with four repetitions for each design using the same printer, PLA material, and fixed printing parameters. Energy consumption, printing time, final part mass, support/waste material amount, and carbon dioxide equivalent emissions were measured, and specific energy consumption was calculated. Mechanical adequacy was assessed through static analyses, while stiffness was evaluated using the z-direction displacement measured under a specified load. Criterion weights were determined using the Fuzzy AHP method, and the alternatives were ranked using the TOPSIS approach. The industrial symbiosis approach was incorporated into the decision model by considering support and waste filament amounts in terms of resource circularity and reuse potential. The findings indicate that generative design strategies offer improvement potential over the conventional model in terms of mass, support/waste generation, energy consumption, and carbon dioxide equivalent emissions; however, these gains vary depending on the design variant with respect to stiffness behavior and specific energy consumption. This study presents a traceable framework integrating experimental measurement, mechanical verification, and multi-criteria decision-making methods for design-oriented sustainability assessment in FDM processes.

Keywords: Fused Deposition Modeling, generative design, sustainability, Fuzzy AHP, TOPSIS, carbon dioxide equivalent

1. Giriş

Eklemeli imalat teknolojileri, üç boyutlu model verilerinden hareketle parçaların katmanlar hâlinde üretilmesine dayanan ve özellikle karmaşık geometrilerin üretiminde önemli tasarım serbestliği sağlayan bir üretim yaklaşımıdır. Eriyik Yığılma Modelleme (EYM/FDM), polimer esaslı filamentin ısıtılmış bir nozuldan kontrollü olarak ekstrüde edilmesi ve katmanlar hâlinde biriktirilmesi prensibiyle çalışan yaygın bir eklemeli imalat yöntemidir. EYM; düşük donanım maliyeti, hızlı prototipleme imkânı, kişiselleştirilebilir üretim kabiliyeti ve karmaşık geometrilerin üretilebilirliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte eklemeli imalatın sürdürülebilirlik açısından sağladığı potansiyel, yalnızca malzeme tasarrufu veya parça hafifletme ile sınırlı değildir; enerji talebi, baskı süresi, destek yapısı ihtiyacı, atık oluşumu ve üretim sonrası işlemler de çevresel performans üzerinde belirleyici olmaktadır (Gebler et al., 2014; Ford & Despeisse, 2016; Gibson et al., 2021).

EYM süreçlerinde çevresel performansın yalnızca nihai parça kütlesi veya kullanılan filament miktarı üzerinden yorumlanması yeterli değildir. Üretim süresinin uzaması, nozul ve üretim tablası gibi termal bileşenlerin daha uzun süre aktif kalmasına neden olmakta; bu durum toplam enerji tüketimini ve buna bağlı karbon eşdeğeri emisyonunu doğrudan etkilemektedir. Ayrıca takım yolu karmaşıklığı, üretim yönelimi, destek yapısı gereksinimi, boşta hareketler ve geri çekme hareketleri, aynı malzeme miktarıyla üretilen parçalar arasında dahi farklı enerji ve süre değerlerinin oluşmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle EYM tabanlı sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde toplam enerji tüketimi, baskı süresi, özgül enerji tüketimi, destek/atık miktarı ve nihai parça kütlesinin birlikte ele alınması gerekmektedir (Baumers et al., 2011; Kellens et al., 2017; Liu et al., 2018; Peng et al., 2018).

Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu yaklaşımları, belirli yükleme ve sınır şartları altında malzemenin daha etkin konumlandırılmasına olanak sağlayarak hafifletilmiş ve işlevsel geometriler geliştirme potansiyeli sunmaktadır. Bu yaklaşımlar, özellikle havacılık, otomotiv ve insansız hava aracı bileşenleri gibi kütle azaltımının kritik olduğu uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak üretken tasarım çıktılarında elde edilen kütle azalımı, her durumda daha düşük enerji tüketimi veya daha düşük özgül enerji tüketimi anlamına gelmemektedir. Kabuk, iskelet veya hibrit karakterli karmaşık geometriler; süresiz takım yolları, artan destek ihtiyacı, yerel hızlanma-yavaşlama döngüleri ve üretilebilirlik sınırlılıkları nedeniyle yeni ödünleşimler oluşturabilmektedir. Bu nedenle üretken tasarım çıktılarının yalnızca hafifletme başarısı üzerinden değil, üretim süreci ve mekanik performans göstergeleriyle birlikte ele alınması gerekmektedir (Gibson et al., 2021; Barbieri & Muzzupappa, 2022).

Sürdürülebilirlik değerlendirmesinde mekanik işlevselliğin korunması da kritik bir gerekliliktir. Parça kütlesinin azaltılması çevresel açıdan olumlu görünse de bu durum yapısal rijitlik ve servis koşullarındaki fonksiyonel yeterlilik üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilir. Özellikle motor bağlantı aparatı gibi yük aktarımı yapan bileşenlerde, tasarımın yalnızca düşük kütle veya düşük enerji tüketimi sağlaması yeterli değildir; belirli yükler altında kabul edilebilir deplasman ve güvenlik katsayısı da sağlanmalıdır. Bu nedenle hafifletilmiş EYM parçalarının sürdürülebilirlik performansı, mekanik yeterlilikle birlikte değerlendirilmelidir. Bu çalışmada mekanik performans, statik analiz çıktıları ve 33,4 N yük altında deneysel olarak ölçülen z-yönlü deplasman değeriyle karar modeline dâhil edilmiştir.

EYM süreçlerinde destek yapıları ve üretim fireleri, kaynak verimliliği açısından ayrıca önem taşımaktadır. Karmaşık üretken tasarım geometrilerinde destek yapılarının artması, yalnızca ek malzeme tüketimi yaratmakla kalmamakta; baskı süresi, enerji tüketimi, işlem sonrası temizlik ve atık oluşumu üzerinde de etkili olmaktadır. Bu noktada endüstriyel simbiyoz kavramı, üretim atıklarının başka süreçler için ikincil hammadde akışlarına dâhil edilmesi fikrine dayanan teorik bir çerçeve sunmaktadır (Chertow, 2000). Bununla birlikte, bu çalışmada fiziksel geri dönüşüm, yeniden ekstrüzyon veya gerçek bir endüstriyel simbiyoz uygulaması gerçekleştirilmemiştir. Endüstriyel simbiyoz, destek/atık malzeme miktarının kapalı çevrim ikincil hammadde akışlarına entegrasyon potansiyelini tartışan kavramsal bir değerlendirme katmanı olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşım, EYM süreçlerinde oluşan polimer atıkların yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir çıktı olarak değil, döngüsel üretim senaryoları açısından potansiyel bir kaynak akışı olarak yorumlanmasına olanak sağlamaktadır (Baechler et al., 2013).

EYM tabanlı üretken tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesi, birbiriyle çelişebilen çok sayıda kriterin birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Düşük kütle, düşük enerji tüketimi, kısa baskı süresi, düşük destek/atık miktarı, düşük karbon eşdeğeri emisyonu ve yüksek mekanik rijitlik hedefleri her zaman aynı tasarım alternatifinde birleşmeyebilir. Bu nedenle sürdürülebilir tasarım seçimi, yalnızca tek bir performans göstergesine göre değil, çok kriterli karar verme yaklaşımıyla değerlendirilmelidir.

Literatürde Analitik Hiyerarşi Prosesi ve TOPSIS gibi yöntemler, kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve alternatiflerin ideal çözüme yakınlık temelinde sıralanması için yaygın biçimde kullanılmaktadır (Saaty, 1980; Hwang & Yoon, 1981). Bulanık AHP ve TOPSIS yaklaşımları ise belirsizlik içeren uzman değerlendirmelerinin karar modeline aktarılmasında ve sürdürülebilirlik odaklı alternatif seçim problemlerinde kullanılabilmektedir (Ertuğrul, 2007; Demircan & Yetilmezsoy, 2023; Tekinay & Bozoğlu Batı, 2022; Tran et al., 2024).

Bu çalışma, çok rotorlu İHA sistemlerinde kullanılabilecek bir motor bağlantı aparatı için geliştirilen farklı üretken tasarım stratejilerinin kapıdan kapıya sürdürülebilirlik performansını deneysel ölçüm, mekanik doğrulama ve çok kriterli karar verme yaklaşımıyla bütünleşik olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda geleneksel referans model A0 ile kabuk-dominant A1, iskelet-dominant A2 ve hibrit karakterli A3 üretken tasarım alternatifleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada toplam enerji tüketimi, karbon eşdeğeri emisyonu, baskı süresi, destek/atık malzeme miktarı, nihai parça kütlesi ve 33,4 N yük altında z-yönlü deplasman kriterleri kullanılmıştır. Kriter ağırlıkları uzman görüşlerine dayalı Bulanık AHP ile belirlenmiş, tasarım alternatifleri ise TOPSIS yöntemiyle sıralanmıştır. Bu yönüyle çalışma, üretken tasarımın EYM süreçlerindeki çevresel, operasyonel ve mekanik sonuçlarını tekil göstergeler yerine bütünleşik bir karar destek çerçevesi içinde değerlendirmeyi hedeflemektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada karşılaştırmaya esas teşkil eden vaka çalışması parçası, çok rotorlu İHA sistemlerinde motorun boru taşıyıcıya bağlanması amacıyla kullanılan bir motor bağlantı aparatı olarak belirlenmiştir. Referans geometri A0, konvansiyonel CAD yaklaşımıyla oluşturulmuş ve üretken tasarım varyantlarının çevresel, operasyonel ve mekanik performanslarının karşılaştırılmasında temel referans olarak kullanılmıştır. Üretken tasarım alternatifleri, aynı motor bağlantı arayüzü, aynı boru bağlantı arayüzü, aynı korunan geometriler ve aynı engellenen hacimler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, eklemeli imalatla tasarım geometrisinin üretim süreci ve sürdürülebilirlik göstergeleri üzerindeki etkisini izole etmeyi amaçlayan karşılaştırmalı çalışma kurgusuyla uyumludur (Gibson et al., 2021; Barbieri & Muzzupappa, 2022).

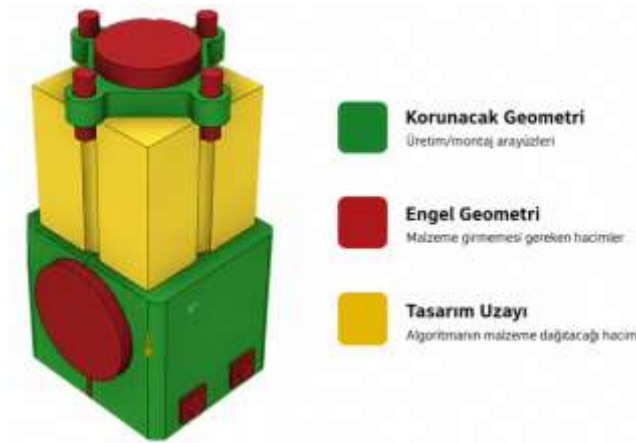


Şekil 10 A0 modeli; (a) A0 referans CAD modeli ve (b) A0 modeli von Mises gerilme dağılımı

Tablo 1. Çalışmada değerlendirilen tasarım alternatifleri

Varyant	Geometrik tanım	Rol
A0	Konvansiyonel referans CAD modeli	Referans
A1	Kabuk-dominant organik geometri	GD kabuk varyantı
A2	İskelet-dominant açık geometri	GD iskelet varyantı
A3	Kabuk-iskelet hibrit geometri	GD hibrit varyantı

A1 varyantı kabuk-dominant bir üretken tasarım stratejisini temsil etmektedir. Bu varyantta malzeme dağılımının sürekli dış kabuklar, geniş geçiş yüzeyleri ve akıcı taşıyıcı form üzerinden gelişmesi hedeflenmiştir. A2 varyantı iskelet-dominant bir yaklaşımla kurgulanmış, malzemenin belirgin yük yolu koridorları boyunca tutulması ve düşük gerilimli bölgelerden uzaklaştırılması amaçlanmıştır. A3 varyantı ise kabuk ve iskelet karakterlerini birlikte kullanan hibrit bir tasarım stratejisi olarak geliştirilmiştir. Böylece A0-A3 karşılaştırması, yalnızca kütle azaltımını değil, üretilebilirlik, destek ihtiyacı, rijitlik ve enerji tüketimi arasındaki olası ödünleşimleri değerlendirecek şekilde yapılandırılmıştır (Barbieri & Muzzupappa, 2022).



Şekil 11 Fusion 360 üretken tasarım stratejisi

Tüm numuneler Bambu Lab A1 Combo Eriyik Yığıma Modelleme (EYM) yazıcı kullanılarak Bambu Lab PLA Basic filament ile üretilmiştir. Dilimleme işlemleri Bambu Studio yazılımında gerçekleştirilmiş; nozul çapı, katman yüksekliği, dolgu oranı, baskı yönelimi ve temel üretim parametreleri tüm alternatiflerde sabit tutulmuştur. Bu tercih, süreç parametrelerinden kaynaklanabilecek değişkenliği azaltmak ve deneysel farkların mümkün olduğunca tasarım geometrisi ile üretken tasarım stratejisinden kaynaklanmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır. Her tasarım alternatifi için dört tekrar üretilmiş ve toplam 16 numune üzerinden deneysel üretim verileri toplanmıştır.

Çevresel değerlendirme kapıdan kapıya sistem sınırı içinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda filament hammaddesinin üretimi, tedarik zinciri, kullanım aşaması, bakım, geri dönüşüm ve kullanım ömrü sonu süreçleri değerlendirmeye dâhil edilmemiştir. Kapıdan kapıya yaklaşım, bu çalışmada tasarım alternatifleri arasındaki üretim süreci kaynaklı farklara odaklanmayı sağlamıştır (Baumers et al., 2011; Kellens et al., 2017; Peng et al., 2018). Deneysel üretim sürecinde tüketilen elektrik enerjisi Mojue SP01 enerji ölçer akıllı priz kullanılarak kaydedilmiş; enerji tüketimi, baskı süresi, nihai parça kütlesi, destek kütlesi ve atık filament kütlesi numune bazında izlenmiştir. Özgül enerji tüketimi, her numune için $SEC = E/m$ bağıntısı ile hesaplanmış; burada E üretim sırasında ölçülen enerji tüketimini, m ise nihai parça kütlesini ifade etmektedir (Liu et al., 2018). Karbon eşdeğeri emisyonu ise $CO_2\text{-eşd.} = E(kWh) \times EF$ bağıntısıyla hesaplanmış ve Türkiye dağıtım hattından bağlı tüketim noktası emisyon faktörü olan 0,469 kg $CO_2\text{-eşd.}/kWh$ değeri kullanılmıştır.

Mekanik yeterlilik değerlendirmesi iki aşamalı olarak yürütülmüştür. İlk aşamada tüm tasarım alternatifleri aynı malzeme kartı, aynı sınır şartları ve aynı yükleme senaryoları altında statik analize tabi tutulmuştur. Motor etkileri 33,4 N itki yükü, 1,4 N·m motor torku ve ± 10 N yönsel yanal yük bileşenleri ile temsil edilmiştir. Bu analizlerde maksimum von Mises gerilmesi, minimum güvenlik katsayısı ve maksimum deplasman değerleri elde edilmiştir. İkinci aşamada ise karar modelinde rijitlik davranışını temsil etmek üzere numunelerin z-yönlü deplasman ölçümü için 33,4 N büyüklüğünde deneysel yük uygulanmış ve belirli yük altındaki düşey deplasman değeri TOPSIS karar matrisine K6 kriteri olarak aktarılmıştır. Böylece mekanik performans yalnızca emniyet katsayısı üzerinden değil, belirli yük altındaki rijitlik davranışı üzerinden de değerlendirilmiştir.

Çalışmada endüstriyel simbiyoz fiziksel bir geri kazanım uygulaması olarak değil, teorik bir potansiyel ve karar modeline entegre edilen kaynak döngüsellliği perspektifi olarak ele alınmıştır. Bu nedenle destek

yapılarının ve atık filamentlerin fiilen yeniden ekstrüzyonu veya kapalı çevrim üretim sürecine geri beslenmesi gerçekleştirilmemiştir. Bunun yerine destek yapılarının ve üretim atıklarının kapalı çevrim ikincil hammadde akışlarına entegrasyon potansiyeli değerlendirilmiş; destek/atık miktarının azaltılması, kaynak verimliliği ve olası endüstriyel simbiyoz senaryoları açısından bir ön gösterge olarak yorumlanmıştır. Bu temkinli konumlandırma, endüstriyel simbiyozun malzeme ve yan ürün akışlarının karşılıklı fayda sağlayacak şekilde kullanılması fikrine dayanan kavramsal çerçevesiyle uyumludur (Chertow, 2000; Baechler et al., 2013).

Çok kriterli karar verme aşamasında kriter ağırlıkları uzman görüşlerine dayalı Bulanık AHP yöntemiyle belirlenmiştir. 31 uzmanın katılımıyla ikili karşılaştırma anketine verdikleri dilsel yanıtlar üçgensel bulanık sayılara dönüştürülmüş, geometrik ortalama yöntemiyle toplulaştırılmış, durulaştırma ve normalizasyon işlemleri sonucunda nihai kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Bulanık AHP yapısı, belirsizlik içeren uzman değerlendirmelerinin sayısallaştırılmasına olanak sağladığından karar problemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Saaty, 1980; Ertuğrul, 2007; Demircan & Yetilmezsoy, 2023). Tutarlılık oranı $CR = 0,009$ olarak hesaplanmış ve 0,10 kabul sınırının altında kaldığı için uzman değerlendirmeleri tutarlı kabul edilmiştir. Nihai alternatif sıralaması ise tüm kriterlerin maliyet yönlü kabul edildiği TOPSIS yaklaşımıyla oluşturulmuş; pozitif ideal çözüm her kriterde en düşük değeri, negatif ideal çözüm ise her kriterde en yüksek değeri temsil edecek şekilde tanımlanmıştır (Hwang & Yoon, 1981; Tekinay & Bozoğlu Batı, 2022; Tran et al., 2024).

3. Bulgular ve Tartışma

Deneysel üretim sonuçları, üretken tasarım stratejisinin yalnızca parça kütlesini değil, enerji tüketimi, baskı süresi, destek/atık oluşumu, karbon eşdeğeri emisyonu ve özgül enerji tüketimini de etkilediğini göstermektedir. Tablo 2’de varyantlara ait temel üretim ve çevresel performans göstergeleri özetlenmiştir. Enerji değerleri dört tekrarın toplam tüketimi ve tekrar başına ortalama tüketim olarak birlikte verilmiştir. Karbon eşdeğeri emisyonu, toplam enerji tüketiminin 0,469 kg CO₂-eşd./kWh katsayısı ile çarpılması sonucunda hesaplanmıştır.

Tablo 2. Deneysel üretim ve çevresel performans sonuçları

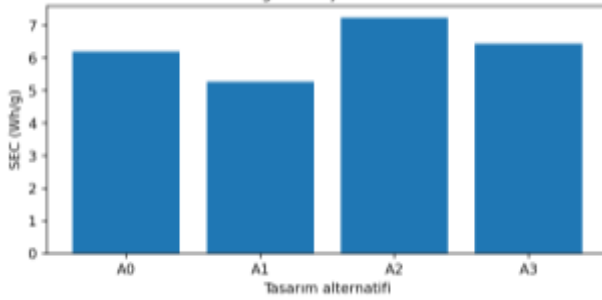
Varyant	Ortalama Nihai kütle (g)	Ortalama Destek (g)	Ortalama Atık (g)	Ortalama Süre (dk)	Toplam enerji (Wh)	CO₂-eşd. (kg)	SEC (Wh/g)
A0	22.98	5.47	1.23	83	570	0.267	6.20
A1	20.40	3.52	1.45	69	430	0.202	5.27
A2	18.30	3.60	1.32	72	530	0.249	7.24
A3	17.45	3.17	1.07	74	450	0.211	6.45

A0 referans modeli, 570 Wh toplam enerji tüketimi ve 0,267 kg CO₂-eşd. emisyon değeri ile en yüksek çevresel etkiyi göstermiştir. A1 kabuk-dominant varyantı, toplam enerji tüketimini 430 Wh seviyesine düşürmüş ve referans modele göre yaklaşık %24,6 oranında enerji ve karbon azalımı sağlamıştır. A3 hibrit varyantı ise 450 Wh enerji tüketimi ile A1’e yakın bir çevresel performans sergilemiş, buna karşılık en düşük nihai parça kütlesini ve en düşük destek kütlesini sağlamıştır. A2 iskelet-dominant varyantı, nihai parça kütlesini referans modele göre belirgin biçimde azaltmasına rağmen toplam enerji tüketiminde A1 ve A3 kadar güçlü bir iyileşme sağlayamamıştır.

Özgül enerji tüketimi açısından en iyi sonuç 5,27 Wh/g ile A1 varyantında elde edilmiştir. A0 referans modelinde bu değer 6,20 Wh/g iken, A3 varyantında 6,45 Wh/g ve A2 varyantında 7,24 Wh/g olarak hesaplanmıştır. Bu durum, üretken tasarımda kütle azalımının tek başına enerji verimliliğini garanti etmediğini göstermektedir. Özellikle A2 varyantı, daha düşük parça kütlesine rağmen en yüksek özgül enerji tüketimine sahiptir. Bunun temel nedeni, iskelet-dominant geometrinin EYM takım yolu açısından daha süresiz ve karmaşık bir yapı oluşturmasıdır. İnce kollar, bağlantı geçişleri ve ayırık yük yolu bölgeleri; nozulun daha sık yön değiştirmesine, boşta hareketlerin artmasına, geri çekme hareketlerinin çoğalmasına ve lokal hızlanma-yavaşlama döngülerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle A2’nin düşük kütle avantajı, üretim dinamiklerinden kaynaklanan enerji yoğunluğu artışı ile kısmen dengelenmiştir.

A3 hibrit varyantı, destek kütlesi ve nihai parça kütlesi açısından en avantajlı sonuçları üretmesine rağmen özgül enerji tüketimi bakımından A1’in gerisinde kalmıştır. Bu sonuç, hibrit geometrinin kütle

ve destek azaltımı açısından güçlü olduğunu; ancak karmaşık kabuk-kafes geçişlerinin takım yolu sürekliliğini sınırlayarak birim kütle başına enerji değerini artırabildiğini göstermektedir. Dolayısıyla EYM tabanlı üretken tasarım süreçlerinde optimum çözüm, yalnızca en düşük kütleye sahip geometri değil; aynı zamanda üretim yolu sürekliliği, destek ihtiyacı ve mekanik yeterliliği birlikte dengeleyen geometri olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 3 Tasarım alternatiflerinin özgül enerji tüketimi değerleri

Mekanik analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Tüm tasarım alternatifleri, tanımlanan statik yükleme koşulları altında minimum güvenlik katsayısı açısından $SF > 2$ kabul koşulunu sağlamıştır. A0 referans modelinde minimum güvenlik katsayısı 5,717 olarak hesaplanmış, üretken tasarım varyantlarında ise hafifletme etkisine bağlı olarak güvenlik katsayısı azalmıştır. Bununla birlikte A1, A2 ve A3 varyantlarının tamamı güvenlik katsayısı eşiğinin üzerinde kalmış ve karşılaştırmalı değerlendirme için yapısal olarak uygun kabul edilmiştir.

Tablo 3. Mekanik analiz ve belirli yük altında deplasman sonuçları

Varyant	Maks. gerilme (MPa)	Min. güvenlik katsayısı	33,4 N altında z-yönlü deplasman (mm)
A0	8.745	5.717	0.069
A1	13.537	3.694	0.055
A2	21.379	2.339	0.114
A3	17.524	2.853	0.117



Şekil 4 Sırasıyla Varyantlara ait üretim sonuçları

Şekil 5 Modellere ait deplasman testleri



(a) A0 referans / geleneksel



(b) A1 kabuk-dominant



(c) A2 iskelet-dominant



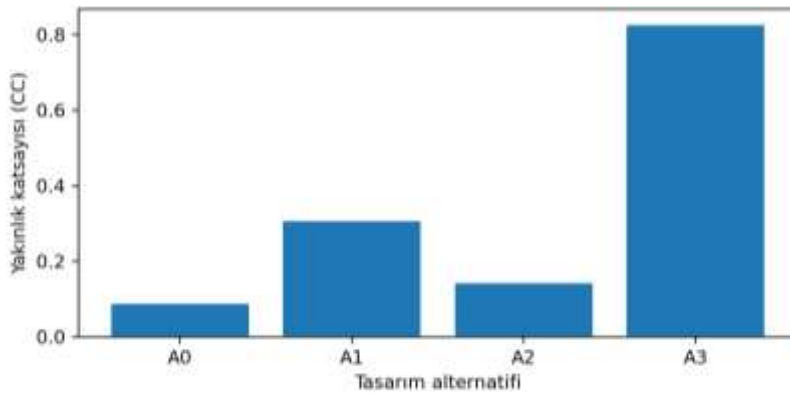
(d) A3 Hibrit

Deplasman sonuçları tasarım stratejileri arasında belirgin farklar olduğunu göstermektedir. A1 kabuk-dominant varyantı 0,055 mm ile en düşük deplasman değerini vermiştir. Bu sonuç, sürekli kabuksal yük taşıma yüzeylerinin rijitlik açısından etkili olduğunu göstermektedir. A2 ve A3 varyantlarında ise hafifletme düzeyi arttıkça deplasman değerleri yükselmiştir. A2 varyantında 0,114 mm, A3 varyantında 0,117 mm deplasman elde edilmiştir. Buna rağmen bu varyantlar güvenlik katsayısı açısından kabul edilebilir sınırın üzerinde kalmıştır. Bu bulgu, üretken tasarımda kütle azaltımı ile rijitlik arasında açık bir değiş tokuş ilişkisi bulunduğunu göstermektedir. Bulanık AHP sonuçlarına göre en yüksek kriter ağırlığı K6 belirli yük altında deplasman kriterinde elde edilmiştir. Bu sonuç karar modelinde mekanik rijitlik göstergesinin kritik bir rol üstlendiğini göstermektedir. Bunu K1 toplam enerji tüketimi ve K4 destek/atık malzeme miktarı takip etmektedir. K2 karbon eşdeğeri emisyonu ve K3 baskı süresi benzer ağırlık değerlerine sahipken, K5 nihai parça kütlesi en düşük ağırlığa sahiptir. Bu dağılım, karar vericilerin yalnızca hafifletmeyi değil, enerji tüketimi, kaynak kullanımı ve belirli yük altında rijitlik davranışını birlikte önemseydiğini göstermektedir.

Tablo 4. Bulanık AHP ile elde edilen kriter ağırlıkları

Kriter	Kriter adı	Ağırlık	Yön
K1	Toplam enerji tüketimi	0.1910	Maliyet
K2	Karbon eşdeğeri emisyonu	0.1512	Maliyet
K3	Baskı süresi	0.1512	Maliyet
K4	Destek/atık malzeme miktarı	0.1686	Maliyet
K5	Nihai parça kütlesi	0.1340	Maliyet
K6	Belirli yük altında deplasman	0.2040	Maliyet

TOPSIS sonuçları, tekil göstergelere dayalı değerlendirmelerin bütünleşik karar modelinde farklı bir denge oluşturabileceğini göstermektedir. A3 hibrit varyantı, 0,8254 yakınlık katsayısı ile en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Bu sonuçta A3'ün düşük nihai parça kütlesi, düşük destek/atık miktarı, referans modele göre daha düşük enerji tüketimi ve karbon eşdeğeri emisyonu ile kabul edilebilir güvenlik katsayısını birlikte sağlaması etkili olmuştur. A1 kabuk-dominant varyantı, 0,3067 yakınlık katsayısı ile ikinci sırada yer almış; düşük enerji tüketimi, kısa baskı süresi ve düşük deplasman değerleriyle öne çıkmıştır. A2 iskelet-dominant varyantı, kütle avantajına rağmen yüksek özgül enerji tüketimi ve daha yüksek deplasman değeri nedeniyle üçüncü sırada kalmıştır. A0 referans modelinin son sırada yer alması ise geleneksel geometrinin güvenli ve üretilebilir olmakla birlikte sürdürülebilirlik göstergeleri bakımından üretken tasarım varyantlarının gerisinde kaldığını göstermektedir.



Şekil 6. Tasarım alternatiflerine ait TOPSIS yakınlık katsayıları

Tablo 5. TOPSIS sonuçları ve nihai alternatif sıralaması

Model Varyant	Tasarım stratejisi	D+	D-	CC	Sıra
A0	Geleneksel referans	0,6980	0,0667	0,0872	4
A1	Kabuk-dominant	0,5302	0,2346	0,3067	2
A2	İskelet-dominant	0,6567	0,1081	0,1413	3
A3	Hibrit	0,1335	0,6312	0,8254	1

Endüstriyel simbiyoz perspektifinden elde edilen sonuçlar, doğrudan fiziksel geri kazanım uygulamasından çok kaynak döngüsellliği potansiyelini göstermektedir. Destek yapılarının azaltılması, yalnızca malzeme tüketimini düşürmekle kalmayıp, kapalı çevrim ikincil hammadde akışlarına entegrasyon potansiyelini de artırmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, üretken tasarım varyantları geleneksel referans modele kıyasla önemli sürdürülebilirlik kazanımları sunmuştur. Ancak her varyant aynı performans profilini göstermemiştir. A1 enerji ve rijitlik açısından güçlü; A2 kütle azaltımı açısından başarılı fakat özgül enerji açısından sınırlı; A3 ise bütünleşik karar modelinde en dengeli alternatif olarak öne çıkmıştır. Bu durum, üretken tasarım çıktılarının yalnızca geometrik hafiflik veya tekil mekanik uygunluk üzerinden değil, üretim süreci ve çevresel göstergelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, EYM yöntemiyle üretilen çok rotorlu İHA motor bağlantı aparatı için geleneksel referans model ve üç farklı üretken tasarım varyantı; kapıdan kapıya sürdürülebilirlik performansı, mekanik yeterlilik ve çok kriterli karar verme yaklaşımı kapsamında değerlendirilmiştir. Bulgular, üretken tasarımın parça kütlesi, destek miktarı, enerji tüketimi ve karbon eşdeğeri emisyonu açısından iyileştirme potansiyeli sunduğunu göstermektedir. Ancak bu iyileşmenin, tasarım stratejisine ve EYM takım yolu davranışına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

A1 kabuk-dominant varyantı, en düşük enerji tüketimi, en düşük özgül enerji tüketimi ve en düşük deplasman değeriyle enerji verimliliği ve rijitlik açısından öne çıkmıştır. A2 iskelet-dominant varyantı, kütle azaltımı açısından avantaj sağlamasına rağmen yüksek özgül enerji tüketimi nedeniyle bütünlüklü karar modelinde sınırlı performans göstermiştir. A3 hibrit varyantı ise kütle, destek/atık azaltımı, karbon performansı ve yapısal yeterlilik göstergeleri arasında dengeli bir sonuç sunarak TOPSIS değerlendirmesinde en uygun alternatif olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın temel katkısı, üretken tasarım çıktılarının sürdürülebilirlik performansını yalnızca kütle azaltımı veya mekanik dayanım üzerinden değil; deneysel enerji ölçümü, karbon hesabı, destek/atık miktarı, z-yönlü deplasman ve uzman temelli karar ağırlıklarıyla birlikte değerlendirmesidir. Bu yönüyle çalışma, EYM süreçlerinde tasarım odaklı sürdürülebilirlik değerlendirmesi için izlenebilir ve uygulanabilir bir karar destek çerçevesi sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda farklı malzemeler, dolgu oranları, üretim yönelimleri, daha yüksek tekrar sayıları ve kapalı çevrim filament geri kazanım senaryoları incelenebilir. Ayrıca EYM parçaların anizotropik mekanik davranışı, yorulma, titreşim ve gerçek uçuş koşullarındaki dinamik yükler dikkate alınarak mekanik doğrulama kapsamı genişletilebilir. Endüstriyel simbiyoz perspektifinin ileri aşamalarında ise destek ve atık filamentlerin yeniden ekstrüzyonu, ikincil hammadde kalitesi ve yeniden kullanım sonrası mekanik performans değişimleri deneysel olarak değerlendirilebilir.

Kaynaklar

- Baechler, C., DeVuono, M. & Pearce, J. M. (2013). Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock. *Rapid Prototyping Journal*, 19(2), 118-125. <https://doi.org/10.1108/13552541311302978>
- Barbieri, L. & Muzzupappa, M. (2022). Performance-driven engineering design approaches based on generative design and topology optimization tools: A comparative study. *Applied Sciences*, 12(4), 2106. <https://doi.org/10.3390/app12042106>
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I. & Hague, R. (2011). Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter? *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas.
- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 313-337.
- Demircan, B. G. & Yetilmezsoy, K. (2023). A hybrid fuzzy AHP-TOPSIS approach for implementation of smart sustainable waste management strategies. *Sustainability*, 15, 6526.
- Ertuğrul, İ. (2007). Bulanık analitik hiyerarşi süreci ve bir tekstil işletmesinde makine seçim problemine uygulanması. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 171-192.
- Ford, S. & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587.
- Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M. & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158-167.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer.
- Hwang, C. L. & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer.
- Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R. & Duflou, J. R. (2017). Environmental dimensions of additive manufacturing: Mapping application domains and their environmental implications. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S49-S68.
- Liu, Z., Jiang, Q., Ning, F., Kim, H., Cong, W., Xu, C. & Zhang, H. C. (2018). Investigation of energy requirements and environmental performance for additive manufacturing processes. *Sustainability*, 10(10), 3606. <https://doi.org/10.3390/su10103606>
- Peng, T., Kellens, K., Tang, R., Chen, C. & Chen, G. (2018). Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing*, 21, 694-704. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.

- Tekinay, O. N. & Bozoğlu Batı, G. (2022). Askeri alanlarda kullanılmak üzere insansız hava aracı sistemleri seçiminde TOPSIS ve bulanık TOPSIS yönteminin kullanılması. Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 44(1), 78-103.
- Tran, N.-T., Trinh, V.-L. & Chung, C.-K. (2024). An integrated approach of fuzzy AHP-TOPSIS for multi-criteria decision-making in industrial robot selection. Processes, 12, 1723.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FRESH AND HARDENED CONCRETE
PROPERTIES WITH DIFFERENT CEMENT TYPES AND ASSESSMENT OF CARBON
EMISSIONS¹**

MSc Student. Şevki TAŞKIN

Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Gaziantep-Türkiye

Email: stskn7075@gmail.com.tr

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-8715-8098>

¹This paper was produced from the unpublished Master's thesis entitled "Experimental Investigation of Fresh and Hardened Concrete Properties with Different Cement Types and Assessment of Carbon Emissions", completed in the Department of Civil Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gaziantep University.

1. Introduction

Concrete is the most widely used construction material in the world due to its excellent mechanical performance, durability, versatility, and cost-effectiveness. It is an essential material for residential buildings, transportation infrastructure, hydraulic structures, and industrial facilities. With the continuous increase in urbanization and population, global concrete production has reached approximately 30 billion tonnes annually, making concrete the second most consumed material after water. Consequently, the demand for cement, which is the primary binding component of concrete, has also increased significantly (Mehta & Monteiro, 2014).

Despite its engineering advantages, cement production has become one of the major contributors to global greenhouse gas emissions. It is estimated that the cement industry accounts for approximately 7–8% of global anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emissions. The majority of these emissions originate from the calcination of limestone during clinker production and the large amount of thermal energy required in rotary kilns (Habert et al., 2011; IPCC, 2021). Therefore, reducing the environmental impact of cement production has become one of the primary objectives of sustainable construction.

One of the most effective approaches to reducing CO₂ emissions is decreasing the clinker content of cement by incorporating supplementary cementitious materials (SCMs) such as limestone, natural pozzolan, volcanic ash, and fly ash. Besides reducing environmental impacts, these materials may improve certain fresh and hardened concrete properties through filler effects and secondary hydration reactions (Scrivener et al., 2018). However, the influence of different blended cement types on concrete performance may vary depending on their chemical composition, mineralogical structure, and clinker replacement ratio. Consequently, selecting an appropriate cement type requires simultaneous evaluation of mechanical performance and environmental sustainability.

Numerous studies have investigated the effects of blended cements on concrete properties. Neville (2011) reported that limestone-containing cements generally improve workability while maintaining satisfactory strength development. Taylor (1997) emphasized that pozzolanic reactions contribute to the refinement of the pore structure and enhance long-term durability. Similarly, Scrivener et al. (2018) demonstrated that reducing clinker content can substantially decrease carbon emissions without significantly affecting structural performance. Nevertheless, comparative experimental studies evaluating fresh concrete properties, mechanical behavior, and carbon emissions together under identical mixture conditions remain relatively limited.

The present study aims to experimentally compare four commercially available cement types—CEM I 42.5 R, CEM II/A-L 42.5 R, CEM II/A-M (P-L) 42.5 R, and CEM II/A-M (P-V) 42.5 R—by evaluating their effects on the fresh and hardened properties of concrete together with their environmental performance. All concrete mixtures were produced using identical mix proportions, including a constant cement content of 330 kg/m³, a water-to-cement ratio of 0.50, and the same aggregate grading, so that only the influence of cement type was investigated. Fresh concrete properties were assessed through slump, setting time, air content, and porosity measurements, while hardened concrete performance was evaluated by compressive, flexural, and splitting tensile strength tests after 3, 7, and 28 days of curing. In addition, the environmental performance of each cement type was assessed by estimating carbon dioxide emissions according to clinker content.

The findings of this study provide a comprehensive comparison of conventional Portland cement and blended cement systems from both engineering and environmental perspectives. The results are expected to contribute to the selection of sustainable cement types capable of reducing carbon emissions while maintaining the mechanical performance required for structural concrete applications.

2. Materials and Methods

Materials

Four commercially available cement types conforming to EN 197-1 were used in this study: CEM I 42.5 R, CEM II/A-L 42.5 R, CEM II/A-M (P-L) 42.5 R, and CEM II/A-M (P-V) 42.5 R. These cement types represent ordinary Portland cement and blended cements with different clinker replacement levels. All cement samples were supplied by the same cement plant to eliminate possible variations related to manufacturing conditions.

Natural crushed limestone aggregates were used in all concrete mixtures. Three aggregate size fractions, namely 0–5 mm, 5–15 mm, and 15–22.5 mm, were incorporated into the mixtures. All aggregates were obtained from the same quarry and possessed identical mineralogical characteristics. Potable water complying with EN 1008 was used for concrete production. A polycarboxylate ether-based high-range water-reducing admixture was employed to obtain the desired workability while maintaining a constant water-to-cement ratio.

Concrete Mix Design

All concrete mixtures were designed to satisfy the requirements of C30/37 strength class according to TS EN 206. In order to investigate only the influence of cement type, all other mixture parameters were kept constant throughout the experimental program.

The cement dosage was fixed at 330 kg/m³, while the water-to-cement ratio (w/c) was maintained at 0.50 for all mixtures. The chemical admixture dosage was kept constant at 1.1% by cement weight. Aggregate grading and curing conditions were identical for every concrete mixture.

Table 1. Mix Design of the Test Concrete

Material	Unit (kg/m³)
Cement (All Types)	330
Water	149
Fine Aggregate (0–5 mm)	970
Coarse Aggregate (5–15 mm)	211
Coarse Aggregate (15–22.5 mm)	731
Chemical Admixture	3,3

By maintaining constant mixture proportions, the influence of cement composition on concrete performance could be evaluated independently of other variables.

Experimental Procedure

The experimental program consisted of tests on both fresh and hardened concrete properties. Fresh concrete was evaluated immediately after mixing by determining the slump, setting time, air content, and porosity. These tests were performed in accordance with the relevant European standards to assess the workability and consistency of the mixtures.

The hardened concrete properties were evaluated through compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength tests after 3, 7, and 28 days of curing. Standard curing conditions were maintained for all specimens throughout the experimental period. Each test was carried out on three specimens, and the average value was used for evaluation in order to improve the reliability of the results.

In addition to the mechanical tests, the environmental performance of each cement type was assessed by estimating carbon dioxide (CO₂) emissions based on clinker content and internationally accepted emission factors. This approach enabled a comparative evaluation of conventional Portland cement and blended cements in terms of both engineering performance and environmental sustainability.

Overall, the adopted experimental methodology allowed a comprehensive assessment of fresh concrete behavior, strength development, and carbon emissions while ensuring that the observed differences originated solely from the cement type used in each concrete mixture.

3. Findings and Discussion

Fresh Concrete Properties

The fresh concrete properties were evaluated through slump, setting time, air content, and porosity measurements in order to assess the influence of cement type on workability and early-age behaviour. Since all concrete mixtures were produced using identical mix proportions, aggregate grading, water-to-cement ratio, and chemical admixture dosage, the observed differences were attributed solely to the characteristics of the cement used.

The experimental results demonstrated that all mixtures satisfied the workability requirements specified for C30/37 concrete. However, noticeable differences were observed among the investigated cement types. The concrete prepared with CEM II/A-L 42.5 R exhibited the highest workability, indicating that limestone incorporation improved particle packing and reduced internal friction within the fresh concrete matrix. In contrast, CEM II/A-M (P-V) 42.5 R produced comparatively lower workability because the pozzolanic constituents increased the specific surface area of the binder, resulting in slightly higher water demand during mixing.

The setting time measurements also revealed that cement composition influenced hydration behaviour. Ordinary Portland cement (CEM I 42.5 R) exhibited the shortest setting time due to its higher clinker content and faster hydration kinetics, whereas the blended cements showed relatively longer setting times. Nevertheless, all measured values remained within the limits specified by the relevant standards and therefore did not present any practical limitation for concrete production or placement.

Only minor variations were observed in air content among the investigated mixtures, indicating that cement type had little effect on entrapped air under identical production conditions. Likewise, porosity values were very close for all concretes; however, CEM II/A-M (P-V) 42.5 R exhibited the lowest porosity, suggesting the formation of a denser cementitious matrix due to the continued pozzolanic reaction. Reduced porosity is generally associated with improved durability because it limits water penetration and the ingress of aggressive substances.

Overall, the fresh concrete evaluation demonstrated that all investigated cement types provided satisfactory fresh concrete performance. Among them, CEM II/A-L 42.5 R offered the most favourable balance between workability and setting characteristics, while CEM II/A-M (P-V) 42.5 R showed advantages in terms of pore refinement and potential long-term durability.

Hardened Concrete Properties

The hardened concrete performance of the mixtures was evaluated by determining the compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength after 3, 7, and 28 days of curing. The experimental results demonstrated that cement type significantly affected the mechanical properties of concrete, although all mixtures satisfied the strength requirements specified for C30/37 concrete.

The compressive strength results revealed continuous strength development for all mixtures throughout the curing period. At early ages, CEM I 42.5 R exhibited slightly higher strength owing to its higher clinker content and rapid hydration characteristics. However, at later curing ages, the blended cements showed remarkable strength development as a result of continued hydration and pozzolanic reactions. Among the investigated cement types, CEM II/A-L 42.5 R achieved the highest 28-day compressive strength (55.4 MPa), followed by CEM II/A-M (P-V) 42.5 R (54.5 MPa), CEM I 42.5 R (52.7 MPa), and CEM II/A-M (P-L) 42.5 R (48.5 MPa). These results indicate that partial clinker replacement with limestone can improve hydration efficiency and microstructural development without compromising compressive strength.

A similar trend was observed in the flexural and splitting tensile strength tests. The concrete produced with CEM II/A-L 42.5 R consistently exhibited the highest flexural and tensile strengths, demonstrating superior resistance to bending and tensile stresses. This behaviour can be attributed to improved particle packing, enhanced interfacial transition zone (ITZ) characteristics, and the formation of a denser cement matrix. In comparison, CEM II/A-M (P-V) 42.5 R also demonstrated satisfactory long-term mechanical performance due to the contribution of pozzolanic reactions, whereas CEM II/A-M (P-L) 42.5 R produced comparatively lower strength values throughout the experimental program.

Overall, the hardened concrete tests confirmed that blended cements can provide mechanical performance equal to or even superior to conventional Portland cement when appropriate clinker replacement levels are used. The findings also demonstrate that CEM II/A-L 42.5 R achieved the most balanced mechanical performance among the investigated cement types, making it a suitable alternative for structural concrete applications requiring both high strength and improved sustainability.

Environmental Performance

The environmental performance of the investigated concrete mixtures was assessed by estimating the carbon dioxide (CO₂) emissions associated with each cement type. Since clinker production is the primary source of greenhouse gas emissions in cement manufacturing, the clinker content of each cement type was considered the main factor influencing the environmental footprint.

The results demonstrated that the use of blended cements significantly reduced the estimated CO₂ emissions compared with conventional Portland cement. Among the investigated cement types, CEM II/A-M (P-V) 42.5 R exhibited the lowest carbon emissions due to its higher proportion of supplementary cementitious materials and reduced clinker content. In contrast, CEM I 42.5 R generated the highest environmental impact because of its high clinker factor and the energy-intensive clinker production process.

Although CEM II/A-M (P-V) 42.5 R showed the best environmental performance, the mechanical test results indicated that CEM II/A-L 42.5 R provided the highest compressive, flexural, and splitting tensile strengths. Therefore, selecting the optimum cement type should involve a balanced evaluation of both structural performance and environmental sustainability rather than considering only strength or carbon emissions.

The combined assessment performed in this study demonstrates that blended cements represent an effective solution for sustainable concrete production. Among the investigated mixtures, CEM II/A-L 42.5 R offered the most favourable balance between mechanical performance and environmental impact, whereas CEM II/A-M (P-V) 42.5 R was identified as the most environmentally friendly alternative. These findings support the increasing use of low-clinker cements in the ready-mixed concrete industry as an effective strategy for reducing the carbon footprint of concrete without compromising structural performance.

4. Conclusion and Recommendations

This study experimentally evaluated the influence of four commercially available cement types on the fresh, hardened, and environmental performance of C30/37 concrete. By maintaining identical mixture proportions and testing conditions, the effect of cement type was investigated independently of other variables.

The results confirmed that all investigated cement types satisfied the requirements for structural concrete; however, noticeable differences were observed in both fresh and hardened concrete performance. CEM II/A-L 42.5 R exhibited the best overall performance by providing superior workability together with the highest compressive, flexural, and splitting tensile strengths. Conversely, CEM II/A-M (P-V) 42.5 R produced the lowest estimated carbon emissions because of its reduced clinker content.

The findings indicate that blended cements can successfully reduce the environmental impact of concrete production while maintaining satisfactory mechanical properties. Considering both engineering performance and sustainability, CEM II/A-L 42.5 R was identified as the optimum cement type among those investigated. The results also highlight the importance of considering environmental criteria together with mechanical performance during cement selection for structural concrete applications.

Future studies should focus on long-term durability under field conditions and detailed life-cycle assessment (LCA) to further evaluate the sustainability of blended cement systems.

References

- ASTM International. (2022). ASTM C39/C39M-21: *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- ASTM International. (2022). ASTM C78/C78M-22: *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International.

- ASTM International. (2022). ASTM C496/C496M-17: *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- CEMBUREAU. (2021). Activity Report 2021. Brussels, Belgium.
- EN 1008. (2021). *Mixing Water for Concrete – Specification for Sampling, Testing and Assessing the Suitability of Water*. European Committee for Standardization.
- EN 197-1. (2011). *Cement – Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*. European Committee for Standardization.
- Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J. B., & Roussel, N. (2011). *An environmental evaluation of geopolymer based concrete production*. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238.
- Hewlett, P. C., & Liska, M. (Eds.). (2019). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (5th ed.). Elsevier.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Scrivener, K., John, V. M., & Gartner, E. (2018). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry*. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford.
- TS EN 206. (2021). *Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity*. Turkish Standards Institution.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2021). TS EN 12390-3: *Testing Hardened Concrete – Compressive Strength of Test Specimens*. Turkish Standards Institution.

**MECHANICAL AND PHYSICAL PERFORMANCE OF ECO-FRIENDLY MORTARS
ENHANCED WITH WASTE TIRE RUBBER AND REDISPERSIBLE POLYMER POWDERS**

Assoc.Prof. Dr. Benyahia Amar

Department of civil engineering, Faculty of technology, University of Saad Dahlab-Blida 1, Algeria

E-mail: a.benyahia@univ-blida.dz

ORCID: orcid.org/0000-0001-6404-0173

Master. Benyahia Abdessetar

Department of architecture, Faculty of architecture and urbanism, University of Salah Boubnider-
Constantine 3, Algeria

E-mail: abdessetar.benyahia16@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4345-2820>

Abstract

This study investigated the mechanical and physical performance of an innovative eco-friendly mortar formulated with CEM I 42.5 cement, polypropylene fibers, a redispersible polymer powder, and varying percentages of waste tire rubber powder (0% to 20% by weight of cement). The experimental results demonstrate that while the incorporation of rubber powder progressively reduces compressive strength and workability due to the hydrophobic nature of the rubber particles and weak interfacial bonding, it significantly enhances the material's ductility and energy absorption capacity. The adverse effects on mechanical properties and water absorption were effectively mitigated by the 5% polymer addition, which formed a continuous film that bridged the gaps between the rubber aggregates and the cement matrix. Ultimately, the formulation containing 5% rubber powder (M5) was identified as the technical optimum, successfully achieving the targeted mini-cone flow of 15–17 cm while maintaining an excellent 28-day compressive strength of over 40 MPa, making it highly suitable for sustainable structural repair applications.

Keywords: Rubberized mortar, Waste tire rubber powder, Redispersible polymer, powder, Ductility and strength.

1. Introduction

In recent years, the construction industry has faced dual pressures: reducing its massive carbon footprint and addressing the depletion of natural aggregates. Concurrently, the disposal of end-of-life tires has emerged as a critical environmental challenge globally, with billions of scrap tires stockpiled or landfilled, posing severe fire hazards and ecological risks. Utilizing waste tire rubber in the form of crumb rubber or fine powder as a partial replacement for aggregates or cementitious components in concrete and mortar represents a highly promising avenue within the framework of the circular economy. This approach not only diverts hazardous waste from landfills but also allows for the development of lightweight, ductile, and eco-friendly construction materials. Previous research has extensively documented both the advantages and drawbacks of integrating rubber into cementitious matrices. Pioneer works by Topçu (1995) and Eldin & Senouci (1993) established that while rubberized concrete exhibits remarkable energy absorption, impact resistance, and acoustic insulation, it suffers from a significant reduction in compressive and flexural strengths. This mechanical degradation is primarily attributed to two factors: the low stiffness (elastic modulus) of rubber particles, which act as structural voids under load, and the hydrophobic nature of rubber, which results in a weak and porous Interfacial Transition Zone (ITZ) between the rubber particles and the hydrophilic cement paste (Segre & Joekes, 2000). To overcome these structural deficiencies, recent advancements have focused on chemical and physical modifications of the mix. The introduction of polymers, such as redispersible polymer powders (RPP), has been shown to form a continuous polymer film throughout the matrix, bridging the micro-gaps at the ITZ and significantly restoring flexural strength and adhesion (Angelin et al., 2019). Furthermore, the addition of short synthetic fibers, such as polypropylene (PP) fibers, has proven highly effective in controlling shrinkage cracking and providing post-cracking residual strength through crack-bridging mechanisms (Medina et al., 2017). While most existing literature focuses on substituting large volumes of natural sand with coarse crumb rubber, there is a lack of data regarding the combined effects of ultra-fine rubber powder (used as a direct additive relative to cement weight) interacting simultaneously with rapid-hardening binders like CEM I 42.5, polycarboxylate superplasticizers, and polymer-fiber networks. Therefore, this study aims to evaluate the fresh and hardened properties of a highly optimized technical mortar. By systematically varying the rubber powder content from 0% to 20% under a strict workability target (15–17 cm mini-cone flow), this research seeks to identify the optimal threshold where environmental sustainability and high mechanical performance intersect.

2. Experimental

2.1 Materials used

All mortars were prepared using ordinary Portland cement CEM I 42.5N, conforming to standard European specifications, as the primary binder. Clean, dry silico-calcareous sand with a grain size distribution of 0-2mm constituted the mineral skeleton.



Fig.1 Mechanical milling and multi-deck screening equipment used for processing recycled tire rubber into fine powder

The innovative phase consisted of an ultra-fine waste tire rubber powder (*Figure 1*) incorporated as an additive at four dosages: 0% (Reference), 5%, 10%, and 20% by weight of the cement. To optimize performance, two fixed components were added to all mixes: a RPP (ethylene-vinyl acetate, EVA) at 5% of the cement weight to guarantee high adhesion, and monofilament polypropylene (PP) fibers 12 mm in length at a fixed dosage of 1 kg/m³ to mitigate plastic shrinkage cracking. A new-generation polycarboxylate ether (PCE) superplasticizer was introduced at a baseline of 3.8 kg to regulate workability while maintaining a strict, low water-to-cement (E/C) ratio of 0.40.

2.2 Mixing detail

Table 1. Formulation of Mortar Mixes with Tire Rubber Powder, EVA, and PP Fibers (kg/m³)

Mixes	Cement	Tire rubber	EVA	Sand	PPF	Superplasticizer
M0	450	0	22.5	1400	1	3.8
M5	427.5	22.5	22.5	1400	1	3.8
M10	405	45	22.5	1400	1	3.8
M20	360	90	22.5	1400	1	3.8

The experimental method began with a thorough 2-minute dry-mixing of the cement, sand, rubber powder, polymer, and fibers in a laboratory pan mixer to ensure homogeneous particle dispersion. Approximately 90% of the mixing water was then added, followed by the remaining 10% pre-blended with the PCE superplasticizer.

2.3 Methods

Workability was immediately assessed using a mini-cone flow test, tracking the target spread of 15-17 cm. Prismatic specimens (4×4×16 cm) were cast, compacted on a vibrating table, and demolded after 24 hours. The specimens were cured in a controlled climatic chamber at 20°C and 95 %relative humidity. Destructive testing was performed at 2, 7, and 28 days to determine compressive strength and three-point flexural strength. Finally, durability was quantified at 28 days through dry density profiling and water absorption tests (via both total immersion and capillary action), establishing a comprehensive performance map for each mixture.

3. Results

3.1 Workability

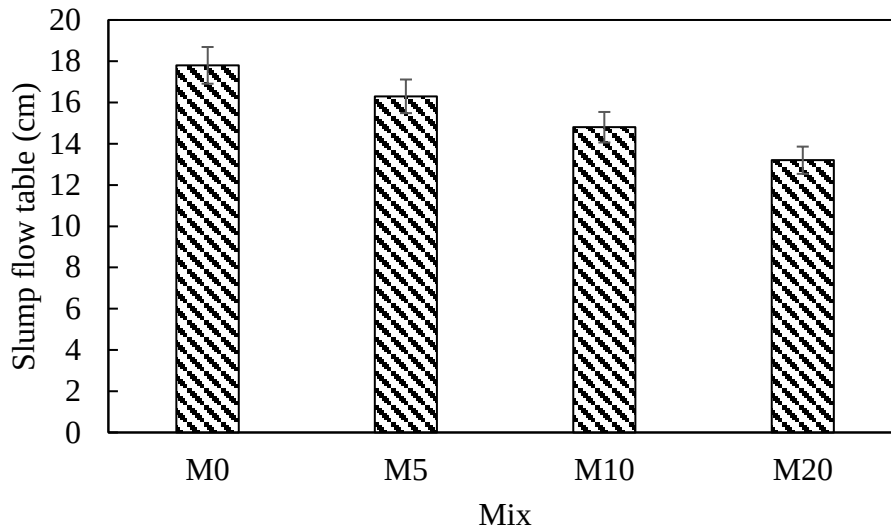


Fig 2. Slump flow table of mortars

Figure 2 illustrates the slump flow of the fresh mortars. The continuous decline in mini-cone flow as the rubber content increases is driven by two main factors: particle morphology and surface chemistry (Moolchandani et al., 2024; Smirnova et al., 2021). Compared to natural sand, waste tire rubber particles possess a highly irregular, rough texture and a distinctively hydrophobic surface. This elevated physical roughness increases internal friction and mechanical interlocking within the fresh mix, while the hydrophobicity actively repels the water required to properly lubricate the cement paste matrix. Consequently, although the fixed dosage of 3.8 kg of polycarboxylate ether-based superplasticizer (PCE) deflocculates the cement grains efficiently by reducing electrostatic and steric hindrance (Youssef et al., 2022), it cannot fully counteract the physical interlocking effect of the rubber aggregates. This rheological resistance ultimately dominates the behavior of the fresh matrix, leading to a progressively stiffer mix at higher replacement rates.

3.2 Dry Density

Figure 3 displays the dry density of the evaluated mortars. The notable reduction in dry density (reaching up to an 18% decline for the M20 mix) is a direct consequence of both volumetric material substitution and unintentional air entrainment (Amin et al., 2026; Eiras et al., 2020). First, the specific gravity of the waste tire rubber particles (approximately 1.1 g/cm³) is significantly lower than that of the natural sand (approx 2.65g/cm³) and Portland cement (approx 3.1g/cm³) it displaces, which inherently lightens the composite matrix (Aslani & Kelikome, 2018).

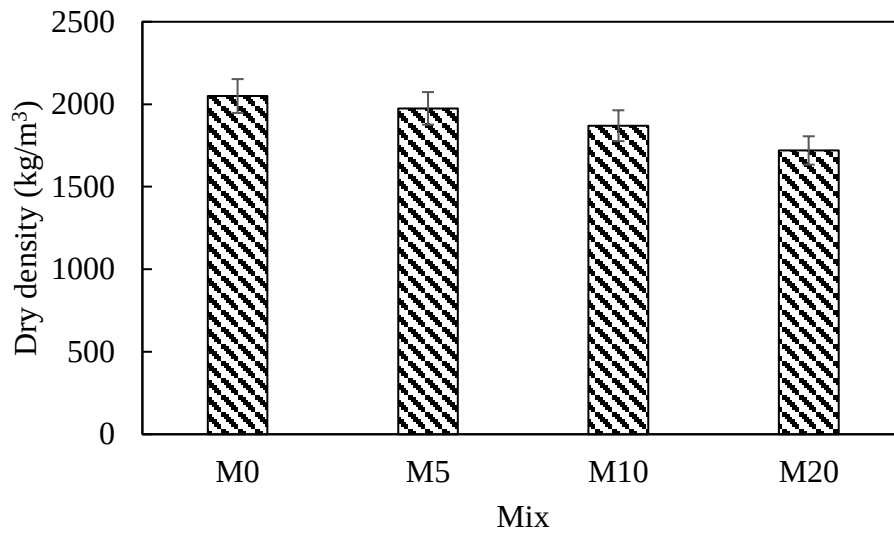


Fig 3. Dry density of mortars

Second, during the mechanical mixing phase, the strongly hydrophobic surface chemistry of the rubber particles induces a physical tendency to entrap microscopic air bubbles across their interfaces (Thomas & Gupta, 2016). While the addition of the superplasticizer and internal polymer film development helps to pack and compact the overall matrix, this inescapable micro-porosity remains dominant. Consequently, this phenomenon ensures that the composite progressively transitions into a lightweight material as the rubber replacement rate climbs.

3.3 Compressive Strength

Figure 4 illustrates the compressive strength development of the mortars over 2, 7, and 28 days of curing. The significant decline in compressive strength across all testing ages primarily stems from the severe stiffness mismatch between the elastomeric rubber aggregates and the rigid matrix surrounding them (Amin et al., 2026; Abdelaleem et al., 2026). Because rubber possesses a much lower elastic modulus, it effectively acts as a "flexible void" within the hard concrete skeleton. Under an axial compressive load, these highly elastic particles deform rapidly, triggering localized stress concentrations in the adjacent cement paste and accelerating microcrack propagation (Moolchandani et al., 2024).

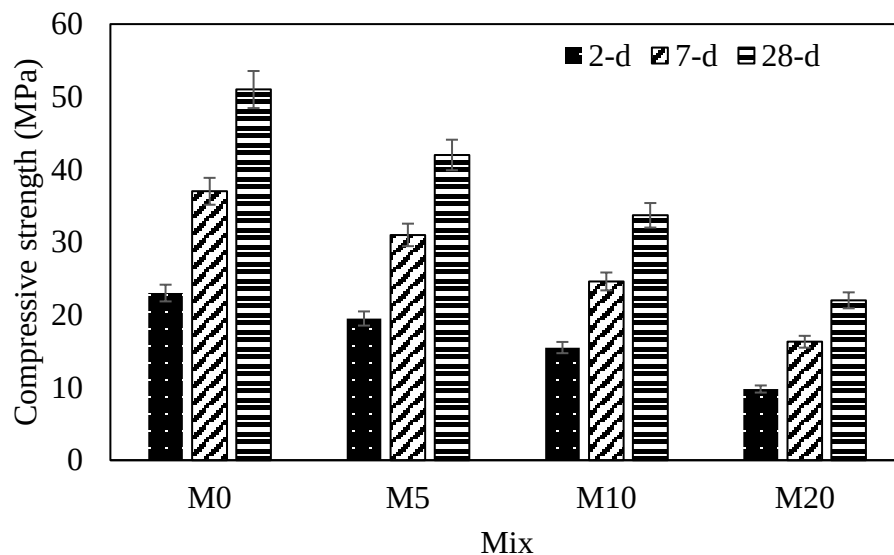


Fig 4. Compressive strength of mortars

Furthermore, the Interfacial Transition Zone (ITZ) between the hydrophobic rubber surface and the hydrophilic cement paste is naturally weak and highly porous, which severely limits effective load transfer across the matrix boundaries. However, despite these structural deficiencies, the early-age strength (at 2 and 7 days) remains relatively high across all investigated mixes. This favorable early

performance is attributed to the rapid hydration kinetics and accelerated early-age strength gain inherent to the high-grade cement used in the mix design.

3.4 Flexural Strength

Figure 5 illustrates the flexural strength performance of the investigated mortars. Unlike the steep declines observed in compressive strength, the flexural capacity benefits significantly from the composite formulation's additive system, exhibiting a markedly gentler degradation curve (Aslani & Kelikome, 2018). When the mortar matrix is subjected to tensile bending stresses, micro-cracks inevitably nucleate and propagate. At this critical stage, the dispersed polypropylene fibers and the coalesced redispersible polymer powder network act synergistically to form a continuous, flexible internal skeleton that bridges these advancing crack tips, effectively delaying catastrophic macro-failure (Moolchandani et al., 2024).

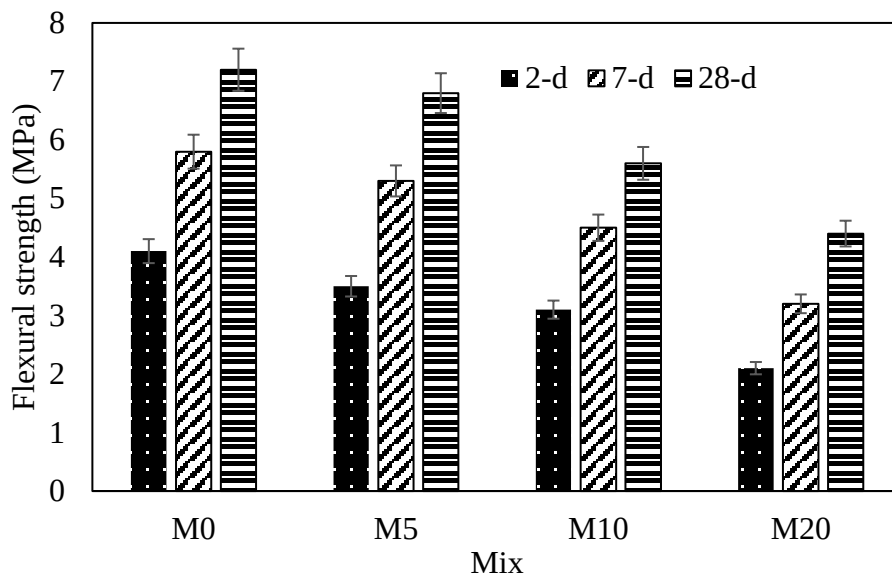


Fig 5. *Flexure strength of mortars*

Concurrently, the embedded rubber particles function as micro-crack arrestors; due to their elastomeric properties, they force propagating cracks to deviate, branch, or twist around the aggregate boundaries, thereby dissipating substantial fracture energy (Thomas & Gupta, 2016). This combined mechanical action fundamentally alters the post-peak behavior, shifting the ultimate failure mode from a brittle, sudden snap in the control mixture to a highly ductile, controlled deformation in the M20 mix.

3.5. Water Absorption

Figure 6 illustrates the water absorption behaviors of the mortars via immersion and capillary action. The experimental data shows that water absorption increases progressively with higher rubber content; a trend that initially appears paradoxical given the waterproof and hydrophobic nature of rubber itself (Eiras et al., 2020). This phenomenon is entirely driven by the altered microstructural topology of the composite. Because the hydrophilic cement paste cannot form a seamless chemical or physical bond with the untreated, hydrophobic rubber grains, a network of micro-interstices and interconnected capillary channels forms around the aggregate boundaries (Thomas & Gupta, 2016). Driven by capillary action, moisture penetrates deeply into the mortar matrix through these interfacial pathways. Fortunately, the inclusion of 5% polymer powder acts as an internal sealant; as the polymer film coalesces, it coats and blocks many of these internal micro-pores and interconnected voids (Aslani & Kelikome, 2018).

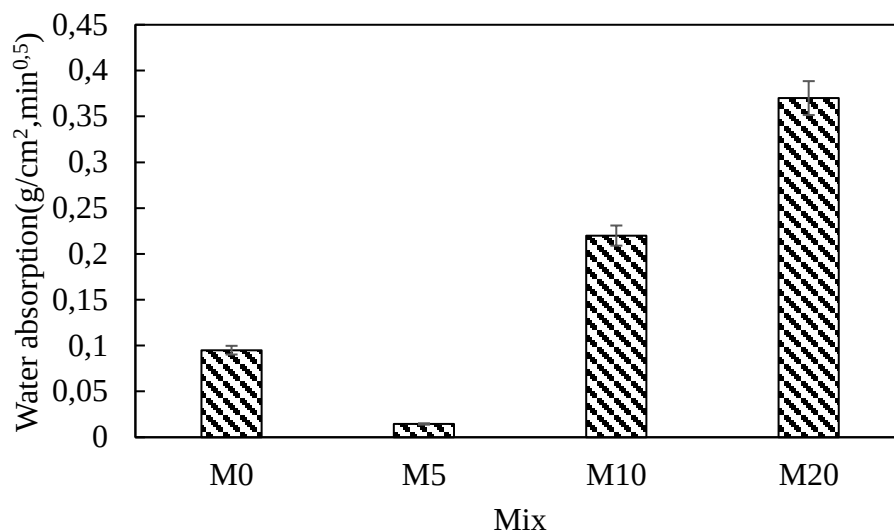


Fig 6. Water absorption of mortars

This polymer-modified sealing mechanism effectively prevents the absorption rates from reaching critical levels that would otherwise jeopardize the long-term frost resistance and durability of the composite.

4. Conclusion

This study successfully evaluated the feasibility of developing an eco-friendly, high-ductility technical mortar by integrating waste tire rubber powder into a high-performance cementitious matrix enhanced with a redispersible polymer and polypropylene fibers. The experimental results confirm that while increasing the rubber content from 0% to 20% by weight of cement induces a progressive decline in dry density and compressive strength, it significantly enhances the material's flexural toughness and capacity to deform without undergoing brittle failure. The incorporation of 5% redispersible polymer powder proved crucial, as it formed a structural film that bridged the naturally weak rubber-cement interface, successfully mitigating excessive water absorption and mechanical loss. Ultimately, the formulation containing 5% rubber powder (M5) was identified as the optimum design. At a controlled superplasticizer dosage of 3.8 kg, it perfectly satisfied the fresh workability target of 15–17 cm while retaining a robust 28-day compressive strength exceeding 40 MPa. This optimum mix demonstrates that waste tire rubber can be effectively valorized to produce sustainable, durable, and crack-resistant mortars suitable for modern structural repair applications.

References

- Abdelaleem, A., et al. (2026). Long-term behavior of rubberized concrete under static and dynamic loads. *Construction and Building Materials*, 412, 134781.
- Amin, M. N., Nassar, R. U. D., Khan, K., & Qadir, M. T. (2026). Integrating testing and modeling methods to examine the feasibility of blended waste materials for the compressive strength of rubberized mortar. *Reviews on Advanced Materials Science*, 65(1), 118-132.
- Amin, M. N., Nassar, R. U. D., Khan, K., & Qadir, M. T. (2026). Integrating testing and modeling methods to examine the feasibility of blended waste materials for the compressive strength of rubberized mortar. *Reviews on Advanced Materials Science*, 65(1), 118-132.
- Angelin, A. F., Santos, R. F. C., da Silva, F. M., Lintz, R. C. C., & Gachet-Barbosa, L. A. (2019). Development of rubberized mortar modified with redispersible polymer powder. *Construction and Building Materials*, 223, 767–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.031>
- Aslani, F., & Kelikome, M. A. (2018). Development of self-compacting rubberized concrete incorporates polypropylene and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 178, 118–137.
- Aslani, F., & Kelikome, M. A. (2018). Development of self-compacting rubberized concrete incorporates polypropylene and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 178, 118–137.
- Aslani, F., & Kelikome, M. A. (2018). Development of self-compacting rubberized concrete incorporates polypropylene and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 178, 118–137.

- Eiras, J. N., Segovia, F., Borrachero, M. V., Monzó, J., & Payá, J. (2020). Physical and mechanical properties of cement mortars containing crumb rubber from recycled tires: Influence of particle size and chemical treatment. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118461
- Eiras, J. N., Segovia, F., Borrachero, M. V., Monzó, J., & Payá, J. (2020). Physical and mechanical properties of cement mortars containing crumb rubber from recycled tires: Influence of particle size and chemical treatment. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118461.
- Eldin, N. N., & Senouci, A. B. (1993). Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), 478–496. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1993\)5:4\(478\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:4(478))
- Medina, N. F., Medina, D., Hernandez-Olivares, F., & Navacerrada, M. A. (2017). Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber aggregates and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 144, 563–573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.181>
- Moolchandani, K., Sharma, A., & Kishan, D. (2024). Enhancing concrete performance with crumb rubber and waste materials: A study on mechanical and durability properties. *Buildings*, 14(1), 161. <https://doi.org/10.3390/buildings14010161> Cited by: 25
- Moolchandani, K., Sharma, A., & Kishan, D. (2024). Enhancing concrete performance with crumb rubber and waste materials: A study on mechanical and durability properties. *Buildings*, 14(1), 161.
- Moolchandani, K., Sharma, A., & Kishan, D. (2024). Enhancing concrete performance with crumb rubber and waste materials: A study on mechanical and durability properties. *Buildings*, 14(1), 161.
- Segre, N., & Joekes, I. (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1421–1425. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00373-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00373-0)
- Smirnova, O. M., Menéndez Pidal de Navascués, I., Mikhailevskii, Vladislav R., Kolosov, O. I., & Skolota, N. S. (2021). Sound-absorbing composites with rubber crumb from used tires. *Applied Sciences*, 11(16), 7347. <https://doi.org/10.3390/app11167347> Cited by: 111
- Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323–1333.
- Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323–1333.
- Topçu, İ. B. (1995). The properties of rubberized concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 304–310. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00014-3)
- Youssif, O., Mills, J. E., Elchalakani, M., Alanazi, F., & Yosri, A. M. (2022). Geopolymer concrete with lightweight fine aggregate: Material performance and structural application. *Polymers*, 15(1), 171. <https://doi.org/10.3390/polym15010171> Cited by: 60

**CHALLENGES OF ORGANIZING GUIDANCE AND COUNSELLING PROGRAMMES IN
SOME SELECTED TERTIARY INSTITUTIONS IN SOKOTO STATE: NEED FOR CASSON
INTERVENTIONS**

BASHIRU MUHAMMAD LIMAN, Ph.D

Department of Guidance and Counselling,
Shehu Shagari University of Education, Sokoto, Nigeria
bashiru.liman@ssues.edu.ng/08065878471

ORCID ID: 0009-0005-3853-845X

Abstract

Guidance and counselling programmes play a significant role in tertiary institutions by supporting students' academic adjustment, career development, personal-social growth, and psychological well-being. The increasing complexity of student challenges such as academic stress, poor adjustment, career uncertainty, social problems, and mental health concerns has made effective counselling services necessary in higher institutions. However, many tertiary institutions in Nigeria experience difficulties in organizing and sustaining effective guidance and counselling programmes due to inadequate funding, shortage of qualified counsellors, insufficient facilities, poor awareness among students, and limited institutional support. This study examines the challenges of organizing guidance and counselling programmes in some selected tertiary institutions in Sokoto State and explores the need for interventions by the Counselling Association of Nigeria (CASSON). The study is guided by the belief that professional counselling services require adequate planning, trained personnel, ethical standards, and continuous professional development. CASSON, as a professional body for counselling practitioners in Nigeria, has a role in promoting standards, training counsellors, advocating for effective counselling services, and strengthening counselling practice. The study adopts a descriptive research approach and focuses on identifying factors affecting effective counselling programme delivery. It is expected that findings will provide useful information for educational administrators, counsellors, policymakers, and professional bodies on improving counselling services in tertiary institutions. Effective CASSON interventions through training, monitoring, advocacy, and institutional collaboration are recommended to improve the quality and accessibility of guidance and counselling programmes in Sokoto State tertiary institutions.

Keywords: Guidance and Counselling, Tertiary Institutions, Challenges, CASSON, Counselling Services.

Introduction

Guidance and counselling is an important component of the educational system that helps students deal with academic, social, emotional, and career-related challenges. In tertiary institutions, guidance and counselling programmes are designed to support students in areas such as career choice, adjustment to campus life, personal development, academic improvement, and decision-making. However, despite the importance of guidance and counselling services, many tertiary institutions face challenges in effectively organizing and implementing these programmes. Some of these challenges include inadequate funding, shortage of qualified counsellors, lack of counselling facilities, poor awareness among students, heavy workload of counsellors, and insufficient administrative support.

In Sokoto State tertiary institutions, these challenges may affect the effectiveness of counselling services and limit students' access to professional support. The need for intervention by the **Counselling Association of Nigeria (CASSON)** becomes important because the association plays a role in promoting professional counselling standards, training counsellors, advocating for effective counselling services, and supporting institutions in improving guidance programmes. Guidance and counselling has become an important component of modern education systems because of the increasing social, academic, emotional, and career challenges faced by students. In tertiary institutions, students experience new responsibilities, academic pressure, career decisions, financial difficulties, and personal adjustment problems. Effective guidance and counselling programmes provide support that enables students to make informed decisions and achieve personal and academic success.

According to Okobiah and Okorodudu (2006), guidance and counselling services are designed to assist individuals to understand themselves, develop their abilities, and make appropriate choices in life. In tertiary institutions, counselling goes beyond academic advice to include career guidance, personal-social counselling, psychological support, and adjustment services.

The importance of counselling services in Nigerian tertiary institutions has increased due to rising student enrolment and emerging challenges such as examination stress, cultism, drug abuse, insecurity, and mental health concerns. However, despite the relevance of counselling programmes, many institutions struggle to organize effective services because of inadequate resources and weak administrative support. Studies have identified inadequate funding, shortage of trained counsellors, poor infrastructure, and lack of counselling materials as major barriers to effective counselling delivery in Nigerian higher institutions. The Counselling Association of Nigeria (CASSON) was established as a professional body to promote counselling practice, improve professional standards, and support counsellors in different sectors including education. The association emphasizes the importance of guidance and counselling services for educational, vocational, social-personal, and other areas of human development.

In Sokoto State, tertiary institutions require effective counselling programmes to assist students in managing academic and personal challenges. Therefore, examining the challenges affecting the organization of these programmes and identifying possible CASSON interventions is necessary. This study therefore seeks to examine the challenges affecting the organization of guidance and counselling programmes in selected tertiary institutions in Sokoto State and explore how CASSON interventions can improve the effectiveness and sustainability of counselling services.

Statement of the Problem

Despite the importance of guidance and counselling programmes in tertiary institutions, many institutions have not fully achieved effective counselling service delivery. Some counselling units operate with limited facilities, insufficient personnel, inadequate funding, and low recognition from institutional authorities. Students who require counselling support may fail to access these services because of lack of awareness, fear of stigma, or poor organization of counselling units. These challenges may reduce the ability of counselling programmes to address students' academic, emotional, and social needs. Therefore, this study seeks to investigate the challenges of organizing guidance and counselling programmes in selected tertiary institutions in Sokoto State and determine how CASSON interventions can improve counselling practice.

Research Objectives:

The objective are to;

1. Identify the challenges facing the organization of guidance and counselling programmes in selected tertiary institutions in Sokoto State.

2. Examine the level of availability of counselling facilities and personnel in tertiary institutions.
3. Identify the role of CASSON in improving guidance and counselling services.
4. Suggest strategies for effective implementation of counselling programmes.

Research Questions:

1. What challenges affect the organization of guidance and counselling programmes in tertiary institutions in Sokoto State?
2. Are adequate counselling facilities and qualified counsellors available in these institutions?
3. How can CASSON contribute to improving guidance and counselling programmes?
4. What measures can enhance effective counselling services in tertiary institutions?

Concept of Guidance and Counselling

Guidance and counselling is a professional helping service designed to assist individuals in understanding themselves and solving problems related to education, career, and personal development. Guidance involves providing information and direction, while counselling involves helping individuals understand and overcome personal challenges. According to Gysbers and Henderson (2012), comprehensive counselling programmes help learners develop academically, socially, and professionally through planned and organized services. According to **Okobiah and Okorodudu (2006)**, guidance is a continuous process of assisting individuals to understand themselves and their environment so that they can make appropriate choices and adjustments. Counselling, on the other hand, involves face-to-face interaction between a professionally trained counsellor and a client with the aim of facilitating behavioural change, personal growth, and problem-solving.

Similarly, **Corey (2021)** defines counselling as a collaborative professional relationship that empowers individuals to achieve mental wellness, educational success, career development, and personal effectiveness. In educational institutions, guidance and counselling contributes significantly to students' academic adjustment, emotional development, career planning, interpersonal relationships, and psychological well-being. The **American Counseling Association (ACA, 2014)** further emphasizes that professional counselling promotes wellness, prevents psychological problems, and assists individuals in overcoming developmental and situational challenges. In tertiary institutions, counselling services extend beyond vocational guidance to include mental health counselling, crisis intervention, academic advising, substance abuse prevention, stress management, and psychosocial support.

Owobamigbe and Ogunode (2021) examined Guidance and Counselling Services in Nigerian Tertiary Institutions: Problems and Solutions. The study identified major challenges affecting counselling services in Nigerian higher institutions, including inadequate funding, shortage of trained counsellors, inadequate facilities, and lack of counselling materials. The authors recommended increased funding, employment of professional counsellors, and provision of counselling resources. The study relates closely to the present research because it highlights the organizational challenges affecting counselling programmes in tertiary institutions.

Chinwuba, Agerewe and Bitrus (2023) the researchers studied Guidance and Counselling Service in Nigerian University System: Problems and Way Forward. The study found that poor funding, inadequate counselling materials, insufficient professional development, shortage of counsellors, and negative attitudes toward counselling services hinder effective counselling delivery in Nigerian universities. This study supports the need for institutional improvement and professional interventions such as those provided by CASSON.

Asikhia in his Study on Guidance and Counselling Programmes in Tertiary Institutions. The study investigated guidance and counselling programmes among tertiary institutions and examined their relationship with students' behavioural challenges. Findings showed that effective counselling programmes can reduce problems such as indiscipline and student unrest when properly organized and supported. The study demonstrates the importance of effective counselling organization in promoting student adjustment and discipline.

Akinade (2012) Akinade examined the role of counselling services in assisting students with academic and personal challenges. The study revealed that counselling contributes to students' decision-making, adjustment, and educational success but requires adequate professional support and resources. It supports the argument that effective counselling programmes require proper planning and qualified personnel. Gysbers and Henderson (2012) studied comprehensive guidance programmes and found that successful counselling programmes depend on proper planning, trained counsellors, evaluation systems,

and administrative support. The study supports the importance of organized counselling structures in tertiary institutions.

Person-Centred Theory (Carl Rogers, 1951): Person-Centred Theory was developed by Carl Rogers. The theory emphasizes that individuals can achieve personal growth when they receive empathy, acceptance, and support. The theory identifies three conditions for effective counselling:

1. Empathy
2. Unconditional positive regard
3. Congruence

The theory is relevant because tertiary students require supportive counselling environments where they can discuss academic, emotional, and personal problems.

Social Learning Theory (Bandura, 1977): Bandura's Social Learning Theory explains that people learn behaviours through observation and interaction with others. In tertiary institutions, students are influenced by their peers, lecturers, and counsellors. Effective counselling programmes can encourage positive behaviours and decision-making among students.

Guidance and Counselling Programmes in Tertiary Institutions

Tertiary institutions such as universities, colleges of education, and polytechnics accommodate students from different social and cultural backgrounds. Many students experience challenges associated with independence, academic workload, career uncertainty, financial problems, and interpersonal relationships. Counselling programmes in higher institutions are designed to support students in areas such as:

Effective counselling programmes help students to:

1. Develop study skills;
2. Make appropriate career choices and Career guidance;
3. Manage stress, Psychological support and emotional problems;
4. Adjustment to campus life;
5. Develop positive behaviours
6. Academic counselling
7. Personal-social counselling

Effective counselling programmes require proper planning, qualified counsellors, adequate facilities, and administrative support. According to **Gysbers and Henderson (2012)**, effective counselling programmes require proper planning, adequate resources, trained personnel, administrative support, and continuous evaluation.

Challenges of Organizing Guidance and Counselling Programmes

1. **Inadequate Funding:** Funding is a major challenge affecting counselling services. Poor financial support limits the establishment of counselling Centres, purchase of materials, and organization of outreach programmes.

2. **Shortage of Qualified Counsellors:** The effectiveness of counselling depends on the availability of professionally trained counsellors. Many institutions experience high counsellor-to-student ratios, which reduce the quality of services provided. To **Chinwuba, Agerewe and Bitrus (2023)**, shortage of qualified counsellors results in excessive workload, reduced accessibility, and ineffective counselling services.

3. **Lack of Counselling Facilities:** Effective counselling requires private and comfortable offices where students can freely discuss personal issues. Lack of appropriate facilities affects confidentiality and professional practice.

4. **Poor Awareness and Stigma:** Some students do not utilize counselling services because they associate counselling with personal weakness or failure. This reduces participation in counselling programmes.

5. **Limited Administrative Support:** Counselling programmes may receive less attention compared with other academic departments. Weak administrative commitment affects programme development and sustainability. Poor Administrative Support Institutional commitment determines the effectiveness of counselling programmes. Lack of administrative support often manifests through poor funding, inadequate staffing, absence of counselling policies, and exclusion of counsellors from institutional decision-making. Akinade (2012) maintain that; administrative support is a major determinant of counselling programme effectiveness.

Concept of CASSON and Its Role in Counselling Development

The Counselling Association of Nigeria (CASSON) is a professional organization established to promote professional counselling practice in Nigeria. CASSON contributes to counselling development through:

1. Organizing conferences and workshops;
2. Improving counsellors' professional skills;
3. Promoting ethical standards;
4. Advocating for recognition of counselling services;
5. Encouraging research in counselling.

CASSON intervention can strengthen counselling programmes in tertiary institutions by supporting professional development and improving service delivery.

Role of CASSON in Improving Guidance and Counselling Programmes

CASSON can support counselling development through:

1. Professional Training

Providing workshops, seminars, and professional development programmes.

2. Advocacy

Promoting recognition and funding of counselling services.

3. Ethical Regulation

Ensuring counsellors follow professional standards and practices.

4. Research and Development

Encouraging research into counselling challenges and solutions.

5. Institutional Collaboration

Working with tertiary institutions to strengthen counselling Centres.

Methodology

The study adopted a **descriptive survey research design**. The descriptive survey design was considered appropriate because it enables the researcher to obtain information from respondents regarding their opinions, perceptions, and experiences concerning the challenges affecting the organization of guidance and counselling programmes in tertiary institutions and the need for CASSON interventions. According to Creswell and Creswell (2018), a descriptive survey design is suitable for collecting data from a representative sample of a population to describe existing conditions without manipulating any variables. The design is appropriate for this study because it allows the researcher to investigate the current status of guidance and counselling programmes in selected tertiary institutions in Sokoto State. The study was conducted in **Sokoto State**, North-West Nigeria. Sokoto State is home to several public tertiary institutions that provide university, polytechnic, and college of education programmes. The selected institutions include: Shehu Shagari University of Education, Sokoto (SSUES), Usmanu Danfodiyo University, Sokoto (UDUS), Ummaru Ali Shinkafi Polytechnic, Sokoto and state College of Nursing Sciences, Sokoto. These institutions were selected because they operate guidance and counselling services and have diverse student populations requiring counselling support, with the population that consists of counsellors, lecturers, and students in selected tertiary institutions in Sokoto State.

A sample size of **350 respondents** was selected using the research advisor (2006). The study employed a **multistage sampling technique: Purposive sampling** was used to select tertiary institutions offering guidance and counselling services. **Stratified sampling** was used to classify respondents into counsellors, lecturers, student affairs officers, and students. **Simple random sampling** was employed to select respondents proportionately from each category.

An illustrative sample distribution is presented below:

Respondents	Population	Sample
Guidance Counsellors	30	20
Lecturers	420	70
Student Affairs Officers	50	20
Students	1,950	240
Total	2,450	350

A researcher designed questionnaire was used in data collection, titled “**Challenges of Organizing Guidance and Counselling Programmes Questionnaire (COGCPQ)**” with two section and strong agree, agree, disagree and strongly disagree as the scale with 4,3,2 and 1 as the score value. Data collected was analyzed using: Frequency, Percentage, Mean and standard deviation

Results

Table 1: Distribution of Respondents by Category

Category	Freq.	Percentage (%)
Counsellors	20	5.7%
Lecturers	70	20%
Students affairs	20	5.7%
Students	240	68.6%
Total	350	100%

The table shows that 68.6% of the respondents were students, 20% were lecturers, while 5.7% were counsellors and 5.7% students affairs staff respectively. This indicates that the study obtained responses from major stakeholders involved in tertiary education.

Research Question one: What challenges affect the organization of guidance and counselling programmes in tertiary institutions in Sokoto State?

Table 2: Challenges Affecting organization of guidance Programmes

Item	Statement	Mean	Decision
1	Inadequate funding affects counselling programmes	3.45	Accepted
2	There are insufficient qualified counsellors	3.38	Accepted
3	Counselling facilities are inadequate	3.52	Accepted
4	Students lack awareness of counselling services	3.21	Accepted
5	Management support for counselling is inadequate	3.40	Accepted

The findings reveal that inadequate funding, shortage of counsellors, poor facilities, low awareness, and weak administrative support are major challenges affecting counselling programmes.

Research Question Two: Are qualified counsellors available in selected tertiary institutions?

Table 3: Availability of Qualified Counsellors

Response	Freq.	Percentage
Yes	35	35%
No	65	65%
Total	100	100%

The result indicates that 65% of respondents believed that qualified counsellors are insufficient in their institutions. This suggests a shortage of professional counselling personnel.

Research Question Three: What is the level of administrative support for counselling programmes?

Table 4: Administrative Support

Item	Mean	Decision
School authorities provide support for counselling activities	2.40	Rejected
Counselling units receive adequate funding	2.30	Rejected
Management recognizes the importance of counselling	2.70	Accepted
Counselling programmes are included in institutional plans	2.45	Rejected

The findings show that administrative support for counselling programmes is generally inadequate.

Research Question Four: What role can CASSON play in improving counselling programmes?

Table 5: CASSON Intervention Strategies

Item	Mean	Decision
CASSON should organize regular training workshops	3.70	Accepted
CASSON should advocate for improved counselling funding	3.60	Accepted
CASSON should support institutions with counselling materials	3.55	Accepted
CASSON should monitor counselling practices	3.48	Accepted

The respondents agreed that CASSON intervention can improve counselling programmes through training, advocacy, monitoring, and professional support.

Summary of Major Findings

1. Guidance and counselling programmes face challenges such as inadequate funding, shortage of counsellors, poor facilities, and limited awareness.
2. Many tertiary institutions experience insufficient availability of professional counsellors.
3. Administrative support for counselling programmes is inadequate.
4. CASSON can significantly improve counselling services through professional development, advocacy, and institutional collaboration.

Discussion of findings

The findings revealed that **inadequate funding, shortage of qualified counsellors, poor counselling facilities, weak administrative support, and limited student awareness** are the major challenges affecting the organization of guidance and counselling programmes in selected tertiary institutions in Sokoto State. This finding is consistent with **Owobamigbe and Ogunode (2021)**, who reported that insufficient financial resources, inadequate infrastructure, and shortage of professional counsellors hinder effective counselling service delivery in Nigerian tertiary institutions. Similarly, **Chinwuba, Agerewe, and Bitrus (2023)** found that poor institutional support and inadequate counselling resources reduce the effectiveness of guidance and counselling programmes in Nigerian universities.

The study further established that **institutional support for counselling programmes is generally inadequate**, particularly in relation to funding, staffing, policy implementation, and administrative commitment. This finding corroborates the work of **Akinade (2012)**, who emphasized that management support is a critical determinant of successful counselling programme implementation. Without strong institutional commitment, counselling units are unlikely to meet the growing academic, career, and psychosocial needs of students.

The findings also indicated that while professionally trained counsellors are available in the selected institutions, **their number is insufficient** to meet the demands of the student population. This agrees with the findings of **Kojigili, Bitrus, and Pheneas (2024)**, who observed that counsellor shortages, excessive workloads, and limited opportunities for professional development reduce the effectiveness of counselling services.

Furthermore, the study revealed that **students are generally aware of the existence of counselling services but do not utilize them regularly** because of stigma, misconceptions, and poor awareness campaigns. This finding aligns with **Omoyemiju (2024)**, who reported that although counselling resources were available in many tertiary institutions, utilization remained low due to inadequate awareness and negative perceptions of counselling.

The study also found that **CASSON has a significant role in strengthening guidance and counselling programmes** through continuous professional development, advocacy, ethical regulation, research promotion, accreditation, and collaboration with tertiary institutions. This finding supports the position of **CASSON (2020)** that professional associations contribute significantly to improving counselling standards, promoting ethical practice, and enhancing the competence of counsellors.

Finally, the hypothesis tests showed significant relationships between organizational challenges, institutional support, availability of qualified counsellors, students' awareness, CASSON interventions, and the effectiveness of counselling programmes. These findings imply that addressing organizational and professional constraints through stronger institutional commitment and active CASSON interventions will improve the quality, accessibility, and effectiveness of guidance and counselling services in tertiary institutions in Sokoto State.

Conclusion

Guidance and counselling programmes are essential in tertiary institutions because they support students' academic, social, and personal development. However, challenges such as inadequate funding, shortage of counsellors, poor facilities, and limited support reduce effectiveness. CASSON interventions can strengthen counselling services through professional training, advocacy, and collaboration.

Implications for CASSON Interventions

The findings of this study have significant implications for the **Counselling Association of Nigeria (CASSON)** as the apex professional body responsible for regulating and promoting counselling practice in Nigeria, in the following;

1. **Strengthening Professional Development:** The shortage of qualified counsellors and the need for continuous professional growth imply that CASSON should intensify its capacity-building programmes. This can be achieved through regular conferences, workshops, seminars, certification courses, and continuing professional development (CPD) programmes focusing on emerging issues such as mental health counselling, trauma counselling, digital counselling, career development, and artificial intelligence in counselling practice.
2. **Policy Advocacy and Institutional Engagement:** The findings indicate inadequate administrative and institutional support for counselling programmes. This suggests that CASSON should strengthen its advocacy efforts by engaging with the regulatory agencies and governing councils of tertiary institutions. Such engagement should aim to ensure the establishment of functional counselling centres, adequate funding, and the inclusion of counselling services in institutional strategic plans.
3. **Development and Enforcement of Professional Standards:** The need for CASSON to develop, disseminate, and monitor minimum standards for counselling practice in tertiary institutions. Regular accreditation, quality assurance visits, and compliance monitoring would help ensure that counselling units meet acceptable professional and ethical standards.
4. **Promotion of Counselling Awareness and Public Enlightenment:** This implies that CASSON should coordinate nationwide awareness campaigns through print media, electronic media, social media, campus outreach programmes, and counselling week celebrations to educate students and the public about the importance and benefits of professional counselling services.
5. **Collaboration with Educational Institutions:** CASSON should establish strategic partnerships with all the tertiary institutions to support curriculum development, student support services, internship opportunities, mentorship programmes, and collaborative research in guidance and counselling.
6. **Promotion of Counselling Research and Evidence-Based Practice:** CASSON should encourage and sponsor research on emerging counselling issues, including student mental health, substance abuse, digital counselling, career adaptability, and counselling programme effectiveness.
7. **Integration of Technology into Counselling Practice:** CASSON should promote the integration of Information and Communication Technology (ICT) into counselling practice. This includes training counsellors in online counselling, tele-counselling, virtual career guidance, digital record management, and ethical use of Artificial Intelligence (AI) in counselling.
8. **Strengthening Ethical Practice:** CASSON should regularly review and enforce its code of ethics through training, monitoring, disciplinary procedures, and ethical awareness programmes.
9. **Improving Counsellor Recruitment and Welfare:** CASSON should advocate for increased recruitment of qualified counsellors into tertiary institutions. The association should also advocate for improved conditions of service, career progression, professional recognition, and remuneration to attract and retain competent counselling professionals.
10. **Establishment of CASSON State Monitoring Committees:** CASSON should establish functional monitoring and evaluation committees at the state level.
11. **Partnership with International Professional Bodies:** CASSON should strengthen partnerships with international counselling organizations such as the American Counseling Association (ACA), the International Association for Counselling (IAC), and the British Association for Counselling and Psychotherapy (BACP).

Recommendations

Based on the findings of the study, the following recommendations were made;

1. Government and institutions should provide adequate funding for counselling programmes.
2. More qualified counsellors should be employed.

3. Counselling offices and facilities should be improved.
4. Students should be encouraged to utilize counselling services.
5. CASSON should strengthen training and monitoring of counselling programmes.
6. Institutions should integrate counselling into their development plans.

References

- Akinade, E. A. (2012). *Modern Behavioural Techniques for Guidance and Counselling Practice*. Ibadan: Brightways Publishers.
- American Counseling Association. (2014). *ACA Code of Ethics*. American Counseling Association.
- Bandura, A. (1977). *Social Learning Theory*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Counselling Association of Nigeria (CASSON). (2020). *Constitution and Professional Guidelines*. CASSON National Secretariat.
- Corey, G. (2021). *Theory and Practice of Counseling and Psychotherapy*. Boston: Cengage Learning.
- Chinwuba, M. A., Agerewe, S. B., & Bitrus, K. (2023). Guidance and Counselling Service Nigerian University System: Problems and Way Forward. *International Journal on Integrated Education*, 6(5), 212–221. (Researchparks Journals)
- Gysbers, N. C., & Henderson, P. (2012). *Developing and Managing Your School Guidance and Counselling Program*. Alexandria: American Counseling Association.
- Kojigili, S. T., Bitrus, P., & Pheneas, C. (2024). Assessment of personal and administrative challenges facing school counsellors of senior secondary schools in Adamawa State, Nigeria. *Asian Journal of Education and Social Studies*, 50(12), 387–399.
- Okobiah, O. C., & Okorodudu, R. I. (2006). *Issues, Concepts, Theories and Techniques of Guidance and Counselling*. Benin City: Ethiope Publishing.
- Omoyemiju, M. A. (2024). Counselling resources in Nigerian tertiary institutions: Exploring availability and accessibility. *Journal of Education and Practice*, 15(1), 24–36.
- Owobamigbe, K. D., & Ogunode, N. J. (2021). Guidance and Counselling Services in Nigerian Tertiary Institutions: Problems and Solutions. *Central Asian Journal of Social Sciences and History*. (cajssh.centralasianstudies.org)
- Rogers, C. R. (1951). *Client-Centered Therapy*. Boston: Houghton Mifflin.

**COMBINE EFFICACY OF AQUEOUS AND METHANOL MANGO AND NEEM LEAVES
EXTRACT AGAINST *S. Aureus***

David Yusuf Hassan

Federal University Dutse, Faculty of Life Science, Department of Microbiology & Biotechnology,
Jigawa-Nigeria.
hassandavidyusuf@gmail.com

Abstract

Traditional medicine has existed since the earliest days of human history. Many plants contain natural substances that can be used to make medicines. Because of this, plants are an important source for discovering and developing new drugs. Bacterial infections are usually treated with antibiotics. However, many bacteria are becoming resistant to these medicines. As a result, infections are becoming harder to treat, leading to longer hospital stays, higher medical costs, and more deaths around the world. The study was conducted to assess the combine efficacy of aqueous mango and neem leaves extract against *S. aureus* isolate. The combined aqueous extracts from mango and neem leaves were tested using well diffusion method for their antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus* isolated from urine samples of patients attending Rasheed Shekoni teaching Hospital Dutse, Jigawa state. Preliminary phytochemical analyses of the plant leaves showed that both plant leaves extracts contain alkaloids, tannins, flavonoids, saponins, cardiac glycosides, and phenols with the exception of AMLE that lack Alkaloid. AMLE show activity with the highest zone of inhibition of 13mm against *S. aureus*. The result of the combined efficacy shows that, AMNLE for *S. aureus* is 14mm. The findings suggest that plant-based antibacterial agents, particularly from the combination of mango and neem leaves, could be developed into alternative therapeutics for managing infections caused by *S. aureus*.

Key words: Antibacterial, Phytochemical, *S. aureus*, *Mangifera Indica*, *Azadirachta indica*, Aqueous, extraction.

CHAPTER ONE

INTRODUCTION

1.1 Background of Studies

Traditional medicine practice is as old as the origin of man (Akinnibosun & Edionwe, 2015). The use of plants in traditional medicine referred to as herbalism or botanical medicine falls outside the mainstream of the Western or Orthodox medicine (Alam *et al.*, 2019). It has been estimated that about two third of the world's population (mainly in the developing countries) rely on traditional medicine as their primary form of health care (Adaramoye *et al.*, 2017). Herbal medicines are popular in developing countries, but of recent, there has been an increase in the use of herbal medicines in the developed world (Mogal *et al.*, 2018).

Treatment of bacterial infections usually centers on the use of antibiotics. However, due to emergence of antibiotic resistance, increased hospital stay, mortality and treatment cost has become an increasing global burden (Suleiman *et al.*, 2016). The need to expand the available pharmaceutical repertoire is underlined by several recent reports, including the 2019 Antibiotic Resistance Threat Report by the Centers for Disease Control and Prevention; this document states that in the United States alone, more than 2.8 million antibiotics resistant infections and more than 35,000 related deaths occur each year (CDC, 2019). Additionally, on a global scale, infectious diseases cause approximately 20% of all deaths each year and are the leading cause of death of children under 5 years old (Martens & Demain, 2017). Many in the medical field agree that devastating statistics like these are a consequence of entering the “post-antibiotic era,” a time in which the efficacies of antibiotics and other antimicrobials are unreliable (Streicher, 2021).

Plants contain many biologically active compounds which have potential for development as medicinal agents. Plants provide an alternative strategy in search for new drugs. There is a rich abundance of plants reputed in traditional medicine to possess protective and therapeutic properties (Kayode & Kayode, 2011). It is likely that plants will continue to be a valuable source of new molecules which may, after possible chemical manipulation, provide new and improved drugs (Uwimbabazi, Uwimana & Rutanga, 2015).

Azadirachta indica commonly known as; neem, or Indian lilac (Dogoyaro) is one of such medicinal plants belonging to the *Meliaceae* family (Abalaka *et al.*, 2012). Different parts of the Neem plant have medicinal properties. The leaf, bark, oil, flower, fruit and seed exhibit great properties which include antiallergic, antifungal, antibiotic, anti-dermatic, anti-bacterial, anti-inflammatory, insecticidal, larvacidal, anti-malarial, anti-ulcer and other biological activities (Campos *et al.*, 2016). Herrera- Calderon *et al.*, (2019) reported that neem has great antimicrobial activity and it contains 35 biological active compounds. They also stated that the leaf juice and things are usually used to clean the teeth and also used as a tonic. It has been in report that people of India place the leaves on their beds, books, cupboards to control bugs (Banerjee *et al.*, 2012). Neem leaf and its constituents have been demonstrated to exhibit immunomodulatory, anti-inflammatory, anti-hyperglycaemic, anti-ulcer, antimalarial, anti-fungal, anti-bacterial, antiviral, antioxidant, anti-mutagenic and anti-carcinogenic properties (Sonalkar *et al.*, 2014).

Mango (*Mangifera indica*) ascribed to the family *Anacardiaceae* has been adjudged as the vital traditionally significant and one of the most economically important tropical fruit crops globally (Barreto *et al.*, 2008). Mango leaves are the potential source of minerals, nitrogen, potassium, phosphorus, iron, sodium, calcium, magnesium, and vitamins, like vitamin A, B, E, and C. The most active biological constituent of mango leaves is mangiferin, followed by phenolic acids, benzophenones, and other antioxidants such as flavonoids, carotenoids, quercetin, isoquercetin, ascorbic acid, and tocopherols (Lauricella *et al.*, 2017). Mangiferin is the main contributor of most of the biological activities of mango extract (Kabir *et al.*, 2017). Mango leave have a great scope of valorization as they are recognized to possess varied phytochemical, biological, and pharmacological properties (Masud, 2016). Extracts of the mango leaves have been utilized for traditional medicines to cure diabetes, bronchitis, diarrhea, asthma, kidney, scabies, respiratory problems, syphilis, and urinary disorders (Kulkarni & Rathod 2010).

Enteric infections and diarrheal diseases may be caused by over 40 pathogens, shed in both human and animal feces, many of which can persist in environmental reservoirs, with different etiologies and dominant transmission pathways (Li *et al.*, 2016). A critical transmission route across all entero-pathogen taxa (defined here as virus, bacteria, or protozoa) is the faecal-oral route, i.e., consumption of fecally contaminated food and water and interaction with fecally contaminated environments (i.e., soil and surface water) (Baker *et al.*, 2018).

Skin is home to millions of bacteria, fungi and viruses that compose the skin microbiota (Grice, 2015). As the largest organ of the human body, skin is colonized by beneficial microorganisms and serves as a physical barrier to prevent the invasion of pathogens. In circumstances where the barrier is broken or when the balance between commensals and pathogens is disturbed, skin disease or even systemic disease can result (Paulino *et al.*, 2006). Infections of the skin and soft tissue, either due to trauma, surgery, or burns may result in the generation of exudates composed of dead leucocytes, cellular debris, and necrotic tissues (Dryden, 2010). Chronic wounds can be colonised on the surface by a wide range of organisms (Matsuura & Barg, 2013). Common bacterial pathogens associated with wound infection include *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae*, *Streptococcus pyogenes*, *Proteus spp*, *Streptococcus spp.*, and *Enterococcus spp.* (Sani *et al.*, 2012). These organisms exhibit natural resistance to many antibiotics and antiseptics in which they may survive for long periods, and may even multiply in the presence of minimal nutrients and have the ability to colonise traumatised skin (Olayinka *et al.*, 2004).

1.2 Statement of the Problem

The misuse and abuse of commercially sold antibiotics has led to drug resistance in the treatment of many infections today, including gastrointestinal infections. This problem increases hospital stay, mortality rate, and treatment cost, which has become an increasing burden to the patient. Antibiotics are also associated with adverse side effects on the host, which include hypersensitivity, depletion of beneficial gut and mucosal microorganisms, immunosuppression and allergic reactions.

Also, due to economic imbalance, drugs and antibiotics are unaffordable to the common man in most developing countries, and this leads to the negligence of treating wounds and infection on time which usually leads to serious health complications and sometimes even leads to death.

1.3 Justification

Plants like neem and mango tree contain many biologically active compounds which can act as antimicrobial against many bacteria and hence can be use in place of antibiotics. Since these plants are available, there extract can be obtained and be applied on wounds to serve as antimicrobial agents thereby reducing the cost of treatment.

Also, since plants are of biological origin, they cause no or less adverse side effect on the host and can be used safely.

1.3 Aim and Objectives

Aim

The aim of this study is to assess the Combine effect of Aqueous Mango and Neem leaves extract on *Staphylococcus aureus*.

Objectives

1. To extract bioactive component from *Azadirachta indica* and *Mangifera indica* leaves using water and methanol as solvents
2. To determine the phytochemical components in *Azadirachta indica* and *Mangifera indica* extracts.
3. To assess the antibacterial activity of *Azadirachta indica* and *Mangifera indica* extract against the test organisms.
4. To determine the minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) of *Azadirachtin indica* and *Mangifera indica* extract on *Staphylococcus aureus*.

1.4 Scope and Limitation of the Research

This study is limited to the Combine effect of Aqueous Mango and Neem leaves extract on *Staphylococcus aureus*. The samples were collected within Jigawa Dutse metropolis.

CHAPTER THREE

MATERIALS AND METHODS

3.1 Collection and Processing of Plant Sample

Neem and Mango tree leaves were collected manually from botanical garden, Federal University Dutse and transported to microbiology Laboratory Federal University Dutse in a clean polythene bag. Botanical Identification and Authentication of the plant leaves was done by a botanist from the Department of Plant Biology, Federal University Dutse. The following taxonomic codes were obtained: FUDHAN:004/43/4 for *Mangifera indica* and FUDHAN:004/43/3 for *Azadirachta indica*. The leaves were washed under running water, oven-dried at 40 °C for two days and ground to powder using a mortar and pestle for further processing.

3.2 Collection of Clinical Bacterial Isolate

The clinical isolate used in this study is: *Staphylococcus aureus*. The isolate was collected from Federal University Teaching Hospital Dutse Jigawa state, and were transported to microbiology laboratory federal university Dutse for further confirmation (Aghara, 2014).

3.2 Confirmation of Test Isolate

Identification and characterization of the isolate was conducted using three procedures namely: cultural characterization, Morphological and biochemical characterization. The pure isolate of the test organism was inoculated on a sterile slants containing Nutrient agar and was stored in a refrigerator at 4°C for future use according to the method described by Udosen, (2018).

3.2.1 Cultural Characterization

A fresh culture of the isolate was obtained by subculturing the organisms on mannitol salt agar. The test organisms was identified using morphological and physiological characteristics.

3.2.2 Gram staining

According to Udosen (2018) smear of the colonies was made on a free grease slide and heat-fixed. Primary stain (crystal violet) was applied on the slide for 30s to 1minute and rinsed with water. Lugol's iodine was added for 1 minute and was washed with water. The smear was decolorized with acetone for 10sec-15sec and was rinsed with water. The smear was counterstained with Safranin for 1minute and was finally washed with water and air dried. the slides were observed under the microscope using a x100 oil immersion objective lens.

3.3.3 Biochemical Characterization

3.3.3.1 Catalase Test

Two milliliters of hydrogen peroxide solution was poured into a test tube. A portion of the test organism was transferred and immersed in the hydrogen peroxide solution in the test tube and observed

3.3.3.2 Coagulase Test

A drop of distilled water was placed on a slide. A colony of the test organism was then emulsified in the slide to make a thick suspension. A loop full of plasma was added to the suspension and mixed gently. The slide was observed for clumping of the organism within 10 seconds.

3.3.3.3 Citrate Test

The citrate utilization test helps to determine whether an organism can be able to utilize citrate as the only source of carbon was prepared according to the manufacturer's instructions and was autoclaved at 121 °C for 15 minutes. The media was cooled and was aseptically poured into test-tubes. Organisms were inoculated into the media, and the tubes were incubated for 18 to 24 hours at 37 °C. The presence of turbidity in the tube indicates that the organism can utilize citrate as the only source of carbon; absence of turbidity indicates negative result.

3.3 Extraction Process

Forty grams (40g) of each of the ground leaves was extracted using soxhlet extraction method. 40g of the sample each was placed in the thimble which was placed in the sample holder of the extraction chamber of the soxhlet extraction apparatus. The condenser (containing the water in-let and out-let hoses) as well as the heating mantle was also put in place. 300ml of methanol was used for the extraction process. The heating mantle was switched on and the extraction began and last for 1 hour after which the solvent was recovered using water bath (Vaghasiya & Chanda, 2007). The dried Neem and Mango leaves were grounded using mortar and pestle into fine particles. Fifty-gram (50g) amount of each ground plant leaves was transferred into a sterile one-liter conical flask and 500ml of solvent (water) was added and mixed properly. The soaked plant substances were allowed to stand at ambient temperatures for 72 hours as described by Doughari and Manzara (2008). Using a funnel, soaked Neem and Mango samples were filtered separately through a sterile muslin filter and again through Whatman No. 1 filter paper into sterile beakers. From each filtrate, the solvent was evaporated via a water bath at 80°C until dryness. The dried substances obtained were stored aseptically in specimen bottles until needed (Doughari & Manzara, 2008).

3.4.0 Phytochemical Screening

Qualitative phytochemical screening was carried out to determine the following compounds; Alkaloids, Tannins, Saponin, Flavonoid, Phenols, and Glycoside using the method described by Udosen (2018).

3.4.1 Test for Alkaloid

Dragendroff's test: The sample was weighed and was dissolved in chloroform. The chloroform was evaporated and the residue was acidified with a few drops of Dragendroff's reagent. The appearance of orange red precipitate indicates the presence of alkaloids.

3.4.2 Test for Tannins

Two drops of 5% of FeCl₃ were added to 1ml of the extract. A dirty green precipitate indicates the presence of tannins.

3.4.3 Test for Saponins

Two milliliters of extract were mixed with 1ml of water in a test tube shaken to mix properly; bubbles formation persisting for 10 mins is evidence indicating the presence of saponins.

3.4.4 Test for Flavonoid

Two grams of magnesium powder and a few drops of HCl were added into 3ml of the extract. A red coloration indicates the presence of flavonoid.

3.4.5 Test for Glycoside

0.5ml of the sample was measured into 2mls of chloroform. A few drops of conc. H₂SO₄ were added slowly. The presence of reddish-brown steroidal ring indicates the presence of Cardiac glycosides.

3.4.5 Test for Phenols

5ml of the extract was pipetted into a 30ml test tube then 10ml of distilled water was added, 2ml of ammonium hydroxide solution and 5ml of concentrated amyl alcohol were added and left to react for 30min. A bluish green color indicates the presence of phenols.

3.5 Preparation of McFarland standard

0.5 McFarland standard was prepared by adding 1ml of conc H₂SO₄ into 99ml of distilled water to give 1% H₂SO₄. 0.0486g of BaCl₂ was weighed and mixed with 1ml of 1% H₂SO₄ acid. Shake until dissolved properly. Distilled water was added up to 10ml and was capped properly in an air-tight container Udosen (2018).

3.6 Standardisation of Inocula

From the pure culture of the bacterial isolates that is not more than 48 hours, four to five colonies will be touched with a wire loop and will be transferred into 5ml of trypticase soy broth (prepared according to the manufacturer's instructions). The broth will be incubated at 35°C at an optimum growth temperature for 2 to 6 hours, until it reaches or exceeds the turbidity of 0.5 McFarland standard. The turbidity of the inoculum and that of the McFarland standard in the tubes will be compared against a card with a white background and a

contrasting black line. The turbidity of the inoculum would be adjusted by either increasing or reducing the turbidity with either adding more colonies or broth (Ruangan & Tendencia 2004).

3.7 Antibacterial Activities Assessment of the Leave Extracts

3.7.1 Preparation of Extract Concentration

Each plant extract was reconstituted with sterile distilled water to give concentrations of 50, 40, 30, 20, and 10mg/ml. The concentration of the stock solution was adjusted to 500mg/ml by taking 2g of the extract that is (2000mg) of the dried extract was dissolved into 4mls of distilled water for aqueous extract and DMSO for methanolic extract respectively. To prepare 10mg/ml of extract concentration, 0.02ml of the prepared 500mg/ml extract was transferred into a sterile measuring cylinder and homogenized with sterile distilled water to a final volume of 1ml. To prepare 20mg/ml, 0.04ml of the prepared 500mg/ml extract was homogenised with sterile distilled water to a final volume of 1ml. For 30mg/ml, 0.06ml of the extract was homogenized to a final volume of 1ml, for 40mg/ml, 0.08ml of the extract was homogenized to a final volume of 1ml, and for 50mg/ml, 0.1ml of the extract was homogenized to a final volume of 1ml with sterile distilled water aqueous extract and with DMSO methanol extract respectively (Abubakar, 2009).

3.7.2 Assay for Antibacterial Activity

The antibacterial screening was carried out using the agar diffusion method as described by Lino and Deogracious (2006). The test bacterial isolates were first inoculated into tubes of nutrient broth separately and incubated at 37°C for 24 h. Each of the cultures was then adjusted to 0.5 McFarland turbidity standards and inoculated (0.1 ml each) onto Nutrient agar (NA) plates. A sterile cork borer was then used to make six wells (6 mm diameter each) for different concentrations of the extract on each of the plates containing cultures of the different test isolates. The different concentrations of 0.1 ml of 10mg/ml, 20mg/ml, 30mg/ml, 40mg/ml and 50mg/ml of the extract were then introduced into four wells using sterile Pasteur pipettes. The fifth wells contain the standard antibiotics Ampiclox (250 mg/ml), which was used as a positive control. The culture plates were allowed to stand on the working bench for 30 min for pre diffusion and were then incubated at 37°C for 18 to 24 hours. The antibacterial activity was determined by measurement of the diameter zones of inhibition (mm) (against the test isolate) around each of the extracts and the antibiotic (Lino and Deogracious 2006).

3.7.3 Test for Minimum Inhibitory Concentration (MIC)

The broth dilution method was used to determine the minimum inhibitory concentration (MIC) of the plant extracts in accordance with the method that was described by Kowalska - Krochmal & Dudek - Wicher (2021) with slight modification. Based on the results of antibacterial testing, the most efficient crude extract was selected for the MIC. Two-fold serial dilutions of the extracts was carried out with nutrient broth. The extract solution of that concentration was serially diluted in five test tubes into different concentrations in mg/ml. A microbial suspension of 0.1ml was added to each of the tubes and was incubated at 37°C for 24 hrs. The control tube was not having test extract but contain the test bacteria, and sterile distilled water was used to dissolve the extracts. After incubation, the visual turbidity was visualised compared with the negative control. The lowest concentration in which the turbidity was not observed was considered as the MIC of the plant extracts.

3.7.4 Test for Minimum Bactericidal Concentration (MBC)

The minimum bactericidal concentration (MBC) was determined by subculturing a loop full of inoculum from all the tubes that showed no visible growth in the MIC test onto Mueller-Hinton agar. After incubation at 37 °C for 24 hours, the culture plates were observed for the presence of growth (Zaidan *et al.*, 2005).

CHAPTER FOUR

RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Result

The result of the extraction process carried out on Neem and mango leaves shows that the four extracts have varying physical characteristics, a pungent smell with methanolic neem extract and mango leaf extracts were reported, and appear dark green in colour, while aqueous neem extract and mango leaf extract have dark brown colour. Both Methanolic and aqueous Neem leaf extracts (MNLE and ANLE) were found to be soft and sticky in texture. Methanolic Mango leaf extract (MMLE) was soft and oily, and aqueous Mango leaf extract (AMLE) was hard in texture. The percentage yield of each of the extracts was also calculated and recorded as shown in table 4.1 below.

Table 4.1: Physical Characteristics of the Extracts.

Plant Extracts	Percentage (%)	Yield	Physical Properties		
			Color	Odour	Texture
AMLE	10.96		Dark Brown	Pungent	Hard
ANLE	11.32		Dark Brown	Pungent	Soft, sticky
MMLE	23.33		Dark Green	Pungent	Soft, Oily
MNLE	13.53		Dark green	Pungent	Soft, Sticky

Key: MNLE = Methanol Neem Leave Extract, MMLE = Methanol Mango Leave Extract, AMLE = Aqueous Mango Leave Extract, ANLE = Aqueous Neem Leave Extract.

Table 4.2 shows the phytochemical screening of the four plant extracts tested. It was found that all the extracts show the presence of the phytochemicals tested except AMLE and MMLE, which lack alkaloids and glycosides, respectively.

Table 4.2: Phytochemical Screening of the Plant Leaves Extracts

Plant extract	Phytochemical Constituents					
	Alkaloids	Saponin	Flavonoid	Tannins	Phenols	Glycoside
AMLE	-	+	+	+	+	+
ANLE	+	+	+	+	+	+
MMLE	+	+	+	+	+	-
MNLE	+	+	+	+	+	+

Key: MNLE = Methanol Neem Leave Extract, MMLE = Methanol Mango Leave Extract, AMLE = Aqueous Mango Leave Extract, ANLE = Aqueous Neem Leave Extract Positive = (+), Negative = (-).

The morphological characteristics of the colonies of the isolates shows that *S. aureus* colonies appear yellow, with yellow zones as observed on mannitol salt agar while *E. coli* appears green metallic sheen colour on eosin methylene blue agar as displayed on table 4.3. The biochemical reaction shows that *S. aureus* appears gram-positive under the x100 oil immersion objective lens with blue colour and cocci shape arranged in cluster form. Likewise, the biochemical test also shows positive catalase and coagulase with negative citrate test. While *E. coli* appears to be gramnegative short rods, which appears to be pink in color under the x100 oil immersion

object lens. Likewise, the biochemical test shows negative catalase, coagulase and citrate test as displayed on table 4.4.

Table 4.3: Morphological Appearance of the Isolates

Isolates	Macroscopy
<i>S. aureus</i>	Yellow colonies with yellow zones on MSA medium.
<i>E. coli</i>	Green metallic sheen colonies on EMB medium.

Key: + = Positive, - = Negative

Table 4.4: Biochemical Test Results on the Isolates

Isolates	Microscopy	Catalase	Coagulase	Citrate
<i>S. aureus</i>	Gram + cocci	+	+	-
<i>E. coli</i>	Gram – short rods	-	-	-

Key: + = Positive, - = Negative

The antibacterial activity of the individual plant extracts against *S. aureus* and *E. coli* isolate was displayed in the tables below. Table 4.5 shows that MMLE and AMLE inhibit the growth of *S. aureus* at 20mg/ml concentration of the extracts with a zone of inhibition of 10mm for both as the lowest zone of inhibition, to 50mg/ml concentration with a zone of inhibition of 13mm for both as the highest zone of inhibition, respectively. The other extract shows no activity.

Table 4.5: Antibacterial Assay of Mango and Neem Leaves Extracts against *S. aureus*

Extracts	Zone of inhibition (mm)/Concentration (mg/ml)				
	10	20	30	40	50
AMLE	NA	10	12	12	13
ANLE	NA	NA	NA	NA	NA
MMLE	NA	10	11	11	13
MNLE	NA	NA	NA	NA	NA

Key: MNLE = Methanol Neem Leave Extract, MMLE = Methanol Mango Leave Extract, AMLE = Aqueous Mango Leave Extract, ANLE = Aqueous Neem Leave Extract, NA = No Activity.

The additive activity of Aqueous mango and neem leaves extract and methanolic mango and neem leaves extract against *S. aureus* shows that the aqueous extract of mango and neem leaves tested against *S. aureus* shows 9mm zone of inhibition at 10mg/ml and shows the highest zone of inhibition of 14mm at 50mg/ml.

The additive activity of methanolic mango and neem leave extracts also shows 8mm zone of inhibition against *S. aureus* at 10mg/ml and 12mm zone of inhibition at 50mg/ml as the highest concentration of the extract.

Table 4.7: Additive Activity of Mango and Neem Leaves Extracts on the Test Isolates

Isolates	Extracts	Zone of inhibition (mm)/Concentration (mg/ml)				
		10	20	30	40	50
<i>S. aureus</i>	AMNLE	9	9	10	12	14
<i>S. aureus</i>	MMNLE	8	11	12	12	12

Key: AMNLE = Aqueous Mango Neem Leaf Extract, MMNLE = Methanolic Mango Neem Leaf Extract, NA = No Activity.

The minimum inhibitory concentrations of the extracts against *S. aureus*. shows that the methanolic mango and neem leaf extract at 20mg/ml have an inhibitory effect on *S. aureus* as shown in the table below while the MBC result shows no efficacy on both organisms at 20mg/ml concentration.

Table 4.8: Minimum Inhibitory Concentration of Mango and Neem Leaves Extracts on *S. aureus*

Isolates	MNLE	Extract Concentration (mg/ml)/Extracts				
		MMLE	ANLE	AMLE	AMNLE	MMNLE
<i>S. aureus</i>	>20	>20	>20	>20	>20	20

Key: AMNLE = Aqueous Mango Neem Leaf Extract, MMNLE = Methanolic Mango Neem Leaf Extract, NA = No Activity.

Table 4.9: Minimum Bactericidal Concentration of Mango and Neem Leaves Extracts on *S. aureus*

Isolates	MNLE	Extract Concentration (mg/ml)/Extracts				
		MMLE	ANLE	AMLE	AMNLE	MMNLE
<i>S. aureus</i>	>20	>20	>20	>20	>20	>20

Key: AMNLE = Aqueous Mango Neem Leaf Extract, MMNLE = Methanolic Mango Neem Leaf Extract, NA = No Activity.

4.2 Discussion

Plants have been known for their ability to maintain good health since antiquity. Nowadays, the interest in natural products as antimicrobial agents has greatly increased due to the gradual collapse of antibiotics caused by the emergence of multidrug-resistant pathogens (Abdallah & Koko, 2017). The present study investigated the additive antibacterial activity of neem and mango leaf extracts (methanolic and aqueous) against *Staphylococcus aureus*. The physical characteristics of the extracts revealed distinct differences in color, texture, and yield. Methanolic extracts, particularly from mango leaves (MMLE), produced the highest yield (23.33%) and exhibited a dark green color with a soft, oily texture. In contrast, aqueous extracts of AMLE had a lower yield (10.96%) and were comparatively harder in texture. This showed that Methanol Solvent is more efficient for extraction than water. This is also in agreement with the study carried out by Mada et al., (2012) on Mango Leaves, with a yield of 15.2% from ten grams of the sample with methanol solvent while Water made a yield of 12.3%. These variations are likely due to differences in solvent polarity, which influences the extraction efficiency and composition of phytochemicals (Edeoga et al., 2005).

Phytochemical screening showed that all extracts contained notable secondary metabolites including alkaloids, saponins, flavonoids, tannins, phenols and glycosides. However, alkaloids were absent in AMLE, and glycosides were absent in MMLE compared to the study carried out by Mada et al., (2012), which shows that alkaloids, saponins, flavonoids, tannins, phenols

and glycosides were present in both Aqueous and Methanolic Mango leaf extract. However, Ohalet and Anyanwu (2012) reported the presence of saponins, anthranoids, anthraquinones, alkaloids, phenols, tannins, phlobatannins and cardiac glycosides in Ethanolic Neem extract. These phytochemicals are widely documented to have antimicrobial, anti-inflammatory, and antioxidant properties (Cowan, 1999). The presence of these compounds suggests that the extracts possess bioactive constituents capable of exerting antibacterial effects.

Antibacterial assays showed that MMLE and AMLE exhibited inhibitory activity against *S. aureus*, with inhibition zones increasing with extract concentration. AMLE and MMLE demonstrated activity against *S. aureus* at all concentrations from 20 to 50 mg/. Both extracts had an inhibition zone diameter of 13mm at the highest concentration of 50mg/ml. These could be due to the active components in the crude extract which may be acting synergistically to produce antimicrobial effects (Elloff, 1998). The standard antibiotics being used in this study had a zone of inhibition of 24mm. The disparity between the activities of the extracts and the standard antimicrobial drug, may be due to the mixtures of bioactive compounds present in the extract compared to the pure compound contained in the standard antibiotic (Olajuyigbe & Afolayan, 2012). This study is in support of a study carried out by Mada *et al.*, (2012), which shows methanolic mango leaf extract antibacterial activity against *S. aureus* at 200 mg/ml, 100 mg/ml and 50 mg/ml; zones in diameters were 19mm, 17mm and 14mm. This study is also in agreement with the study carried out by Disco *et al.*, (2017), who found that aqueous mango leaf extract shows activity against methicillin-resistant staphylococcus with 14mm zone of inhibition at 120mg/ml extract concentration. In a study conducted by Mushore and Matuvhunye (2013), Ethyl acetate and methanol extracts of mango bark extract at 200mg/ml concentration against *S. aureus*, had an inhibition zone diameter of 22mm and 25mm respectively, which is close to a standard antibiotic. However, another study by Singh *et al.* (2021) shows that both ethanolic and aqueous extracts of mango leaves show no activity against *S. aureus*.

Notably, AMLE showed consistent activity against *E. coli* organisms from 10 mg/ml concentration to 50mg/ml with zones of inhibition from 13mm to 15mm, respectively. while MMLE shows activity against *E. coli* only at 50mg/ml with a 13mm zone of inhibition. This suggests a stronger antibacterial efficacy for the aqueous mango extract (AMLE) against *E. coli*. We could suggest that some of the principal antibacterial components of this plant were polar compounds. Most of the identified components with antimicrobial activity extracted from plants are aromatic or saturated organic compounds which are more soluble in polar solvents such as water (Ncube, 2007). This study is in support of a study carried out by Mada *et al.*, (2012) which shows methanolic mango leave extract antibacterial activity against *E. coli* at 200 mg/ml, 100 mg/ml and 50 mg/ml concentrations show zones in diameters were 19mm, 16mm and 13mm respectively and the activity of the aqueous extract of the plant at 200mg/ml, 100mg/ml and 50mg/ml concentration show zones in diameters were 16mm, 14mm and 12mm respectively. However, Uzor & Dick (2023) report that aqueous extract of mango leaves was ineffective against *E. coli*. According to Ncube *et al.* (2008), these observed variations in effectiveness of the plant extracts could be a result of differences in extraction methods, with emphasis on the length of the extraction period, the solvents of choice, pH, and temperature, the size of the particle and the solvent-to-sample ratio.

Neem leaf extracts (MNLE and ANLE), both methanolic and aqueous, showed no antibacterial activity individually. This is also in agreement with the report of Singh *et al.* (2011) which shows aqueous Neem leaf extract has no activity against *S. aureus* organisms but the ethanolic extract of the plant has antibacterial activity of 12.8mm and 10.8mm on *S. aureus*. Uwimbabazi *et al.* (2015) reported zones of inhibition ranging from 14mm to 27mm with ethanol extract. Similarly, Mishra *et al.*, (2013) reported zones of inhibition with neem leaf and seed extracts to range from 8mm to 24mm against *Staphylococcus aureus*. Bright (2023) report zones of inhibition of 19mm, 23mm, 17mm, 21mm, 24mm, 25mm, 22mm, 25mm with ethanolic neem extract against *Staphylococcus aureus* from saliva samples of 8 different patients, and record no activity with aqueous extract.

However, when combined with mango leaf extracts, particularly in the form of additive mixtures (AMNLE and MMNLE), significant antibacterial activity was observed against both bacterial isolates.

The Minimum Inhibitory Concentration (MIC) further validated the efficacy of the combined methanolic extract (MMNLE), which showed inhibitory activity at 20mg/ml against both organisms. This suggests that while neem extracts alone may lack potent antibacterial action, they may enhance the efficacy of other bioactive extracts when combined.

The minimum inhibitory concentration (MIC) result according to this study shows no efficacy on both organisms at a 20mg/ml concentration. It is, therefore, obvious that both extracts are bacteriostatic rather than bactericidal. This means that the extracts used in the present study only stop the growth of the organisms rather than killing them completely.

Overall, the results align with previous findings that mango leaf extracts possess strong antibacterial activity (Akinmoladun *et al.*, 2007), and they support the potential for using plant-based extracts in the development of alternative or complementary antimicrobial agents, especially in resource-limited settings where antibiotic resistance is a growing concern.

CHAPTER FIVE

CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

5.1 Conclusion

This study has demonstrated that mango and neem leaves contain various phytochemicals with potential antibacterial activity. Methanolic and aqueous extracts of mango leaves showed significant antibacterial effects against *Staphylococcus aureus*, with the aqueous mango extract (AMLE) being particularly effective. While neem extracts (MNLE and ANLE) did not show direct antibacterial effects individually, their combination with mango extracts exhibited synergistic effects that enhanced the overall antibacterial efficacy.

The findings suggest that plant-based antibacterial agents, particularly from mango leaves, or additive of Neem and Mango leaves could be developed into alternative therapeutics for managing infections caused by *S. aureus*. The observed synergism in the combined extracts further indicates the potential for formulating multi-plant antimicrobial products to enhance efficacy, and also support the potential for using plant-based extracts in the development of alternative or complementary antimicrobial agents, especially in resource-limited settings where antibiotic resistance is a growing concern.

5.2 Recommendations

Further studies should explore the isolation and purification of the specific bioactive compounds responsible for the antibacterial activity, as well as in vivo efficacy and safety assessments to support potential clinical applications.

REFERENCES

- Abubakar EM. Antibacterial efficacy of stem bark extracts of *Mangifera indica* against some bacteria associated with respiratory tract infections. *Scientific Research and Essay*. 2009;4(10):1031-1037.
- Akinnibosun, Y. H. and Edionwe, D. (2015). Phytochemical constituents and antimicrobial and grain protectant activities of Ugu (*Telferia Occidentalis*) grown in Niger. *Journal of Plant Research* 2(1):51-58.
- Alam, G., Adelolu, T. T. and Oladimeji, S. A. (2019). Antimicrobial Activity of Leaf Extract of *Telferia occidentalis* on Selected Diarrhoea Causing Bacteria in South Western Nigeria, *African Journal of Biotechnology* 4(7):682-684
- Alberts, B.; Johnson, A.; Lewis, J.; Raff, M.; Roberts, K.; Walter, P. Protein Function. In *Molecular Biology of the Cell*; Garland Science: New York, NY, USA, 2002.
- Ali, A., Shahid, M. A., Hossain, M. D., and Islam, M. N. (2019). Antibacterial Bilayered Polyvinyl Alcohol (PVA)-chitosan Blend Nanofibrous Mat Loaded with Azadirachta indica (Neem) Extract. *Int. J. Biol. Macromol.* 138, 13–20. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.07.015
- Ali, B.A.; Alfa, A.A.; Tijani, K.B.; Idris, E.T.; Unoyiza, U.S.; Junaidu, Y. Nutritional Health Benefits and Bioactive Compounds of *Mangifera indica* L (Mango) Leaves Methanolic Extracts. *Asian Plant Res. J.* **2020**, 6, 41–51.
- Adaramoye, A., Arslankaya, E. and Tosun, I. (2017). Lead Removal from Aqueous Solution by Natural and Pretreated Clinoptilolite: Adsorption Equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 146(1-2), 362-371.
- Aghara, H. (2014). Chemical and Aroma Volatile Compositions of Ugwu (*Telferia occidentalis* L.). *Journal Food Chemistry*, 127(4), 10744-1754.
- Abalaka, M., Oyewole, O.A., & Kolawole, A.R. (2012). Antibacterial activities of *Azadirachta Indica* against some bacterial pathogens. *Advances in Life Sciences*, 2(2), 5-8
- Akram, M.; Munir, N.; Daniyal, M.; Egbuna, C.; Gaman, M.-A.; Onyekere, P.F.; Olatunde, A. Vitamins and Minerals: Types, Sources and their Functions. In *Functional Foods and Nutraceuticals*; Springer International Publishing: New York, NY, USA, 2020; pp. 149–172.
- Ahmad A, Shahid M, Hussain FG, Sadik M, Shalizad A (2001). Antimicrobial study on 45 India medical plants resistance to human pathogens, *Journals of medical plants research*. 99(2-4): pp141-155.
- Akinmoladun, F. O., Akinrinlola, B. L., & Farombi, E. O. (2007). Phytochemical constituents and antioxidant activity of extracts from the leaves of *Mangifera indica*. *African Journal of Biotechnology*, 6(3), 247-251.
- Abdallah, E.M., & Koko, W.S. (2017). Medicinal plants of antimicrobial and immunomodulating properties. Spain: Formatex Research Center.
- Abalaka, M., Oyewole, O.A., & Kolawole, A.R. (2012). Antibacterial activities of *Azadirachta Indica* against some bacterial pathogens. *Advances in Life Sciences*, 2(2), 5-8
- Ahmed, W., Azmat, R., Khojah, E., Ahmed, R., Qayyum, A., Shah, A. N., et al. (2022). The Development of a Green Innovative Bioactive Film for Industrial Application as a New Emerging Technology to Protect the Quality of Fruits. *Molecules* 27 (2), 486. doi:10.3390/molecules27020486
- Ashfaq, U. A., Jalil, A., and Ul Qamar, M. T. (2016). Antiviral Phytochemicals Identification from *Azadirachta indica* Leaves against HCV NS3 Protease: an In Silico Approach. *Nat. Prod. Res.* 30 (16), 1866–1869. doi:10.1080/14786419.2015.1075527
- Baur, L., Barbalho, S. M., Bueno, P., Mendes, C. G., Oshiiwa, M., Menezes, M. L., Marinelli, P. S., Santos, P. C., Santos, M. C., Leticia, M., Salzedas, L. M., Nicolau, C. C., and Otoboni, A. M. (2012). Consumption of *Telferia occidentalis* and its Effects on the Biochemical Profile and Intestinal Motility in an Animal Model. *Int J Phytomed* 8(3):427–434.
- Biswas, K., Chattopadhyay, I., Banerjee, R.K., Bandyopadhyay, U. 2002. *Biological activities and medicinal properties of neem (indica)* Current Science, 82 (11), 1336–1345.
- Banerjee, S; Kim., Shariff, M; Khatoon, H., & Yusoff, S.M. (2012). Antibacterial activity of Neem (*Azadrachta indica*). Leaves of *Vibrio* spp. Isolated from cultured shrimp. *Asian J. Animal Veterinary ADV*, 3923: 1-7.

- Barreto, J.C.; Trevisan, M.T.S.; Hull, W.E.; Erben, G.; De Brito, E.S.; Pfundstein, B.; Würtele, G.; Spiegelhalter, B.; Owen, R.W. Characterization and Quantitation of Polyphenolic Compounds in Bark, Kernel, Leaves, and Peel of Mango (*Mangifera indica* L.). *J. Agric. Food Chem.* **2008**, *56*, 5599–5610.
- Baker KK, Senesac R, Sewell D, Sen Gupta A, Cumming O, Mumma J, (2018). Fecal Fingerprints of Enteric Pathogen Contamination in Public Environments of Kisumu, Kenya, Associated with Human Sanitation Conditions and Domestic Animals. *Environ Sci Technol.* 2018; 52(18):10263–74. Epub 2018/08/15. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01528> PMID: 30106283.
- Bae, J., and Jeon, B. (2013). Increased Emergence of Fluoroquinolone-Resistant *Campylobacter jejuni* in Biofilm. *Antimicrob. Agents Chemother.* *57* (10), 5195– 5196. doi:10.1128/AAC.00995-13
- Benelli, G., Bedini, S., Cosci, F., Toniolo, C., Conti, B., and Nicoletti, M. (2015). Larvicidal and Ovideterrent Properties of Neem Oil and Fractions against the Filariasis Vector *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae): a Bioactivity Survey across Production Sites. *Parasitol. Res.* *114* (1), 227–236. doi:10.1007/s00436014-4183-3
- Barreto, J.C.; Trevisan, M.T.S.; Hull, W.E.; Erben, G.; De Brito, E.S.; Pfundstein, B.; Würtele, G.; Spiegelhalter, B.; Owen, R.W. Characterization and Quantitation of Polyphenolic Compounds in Bark, Kernel, Leaves, and Peel of Mango (*Mangifera indica* L.). *J. Agric. Food Chem.* **2008**, *56*, 5599–5610. Ihu
- Bharti, R.P. Studies on antimicrobial activity and phytochemical profile of *Mangifera indica* leaf extract. *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.* **2013**, *7*, 74–78.
- Bright C. F. (2023). Antibacterial Activity of Neem (*Azadirachta indica*) on *Staphylococcus Aureus* *Journal of Health, Applied Sciences and Management*, *7*(1), 238 <https://dx.doi.org/10.4314/johasam.v7i1.29>
- CDC (2019). Antibiotic Resistance Threats in the United States, 2019. Available: www.cdc.gov/DrugResistance/Biggest-Threats.html.
- Clinical Laboratory Standard Institute (2010). Performance standards for antimicrobial susceptibility testing: Nineteenth Informational Supplement. Clinical and Laboratory Standards Institute, Wayne.
- Campos, E.V; de Oliveira, J.L; pascoli, M, de lima, R., & Fraceto, L.F. (2016). Neem oil and grop protection from now to the future. *Front plant Sci*;7: 1494.
- Chhavi, S., Andrea, J.V., Payal, G., Taher, M.G., Tahir, A.R., Arif, H. 2014. Ethanolic Neem (*Azadirachta indica*) Leaf Extract Prevents Growth of MCF-7 and HeLa Cells and Potentiates the Therapeutic Index of Cisplatin. *Journal of Oncology*, Article ID 321754, 10 pages.
- Cowan, M. M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Reviews*, *12*(4), 564–582.
- Diso S. U., Ali M., Mukhtar S. I. and Garba M. (2017). Antibacterial Activity and Phytochemical Screening of *Mangifera indica* (Mango) Stem and Leaf Extracts on Clinical Isolates of Methicillin Resistant *Staphylococcus aureus*. Article no. JAMPS.31127 JAMPS, *13*(1): 1-6
- Del Serrone, P., Failla, S., and Nicoletti, M. (2015a). Natural Control of Bacteria Affecting Meat Quality by a Neem (*Azadirachta indica* A. Juss) Cake Extract. *Nat. Prod. Res.* *29* (10), 985–987. doi:10.1080/14786419.2014.964708
- Dhawan, B. N. (2012). Anti-Viral Activity of Indian Plants. *Proc. Natl. Acad. Sci. India Sect. B Biol. Sci.* *82* (1), 209–224. doi:10.1007/s40011-011-0016-7
- Doughari JH, Manzara S. (2008). In vitro antibacterial activity of crude leaf extracts of *Mangifera indica* linn. *Africa Journal of Microbiology Research*.;2:67- 72.
- Dryden, M.S. (2010) Complicated Skin and Soft Tissue Infection. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy* , *65*, 35-44. <https://doi.org/10.1093/jac/dkq302>
- Dwivedi, V. D., Bharadwaj, S., Afroz, S., Khan, N., Ansari, M. A., Yadava, U., et al. (2021a). Anti-dengue Infectivity Evaluation of Bioflavonoid from *Azadirachta indica* by Dengue Virus Serine Protease Inhibition. *J. Biomol. Struct. Dyn.* *39* (4), 1417–1430. doi:10.1080/07391102.2020.1734485

- Dzotam, J.K.; Kuete, V. Antibacterial and Antibiotic-Modifying Activity of Methanol Extracts from Six Cameroonian Food Plants against Multidrug-Resistant Enteric Bacteria. *BioMed Res. Int.* **2017**, 2017, 1–19.
- Dayal, V.; Dubey, A.; Singh, S.; Sharma, R.; Dahuja, A.; Kaur, C. Growth, yield and physiology of mango (*Mangifera indica* L.) cultivars as affected by polyembryonic rootstocks. *Sci. Hortic.* **2016**, 199, 186–197.
- D[Zbreve]Ami'c, A.M.; Marin, P.D.; Gbolade, A.A.; Risti'c, M.S. Chemical Composition of *Mangifera indica* Essential Oil from Nigeria. *J. Essent. Oil Res.* **2010**, 22, 123–125.
- Ezeonu, C. S.,Tatah,V. S., Imo,C.,Mamma,E.,Mayel,M. H.,Kukoyi,A. J., et al. (2019). Inhibitory Effect of Aqueous and Ethanolic Extracts of Neem Parts on Fungal Rot Disease of *Solanum tuberosum*. *Pak J. Biol. Sci.* 22 (5), 206–213. doi:10.3923/pjbs.2019.206.213
- Edeoga, H. O., Okwu, D. E., & Mbaebie, B. O. (2005). Phytochemical constituents of some Nigerian medicinal plants. *African Journal of Biotechnology*, 4(7), 685– 688.
- Elloff, J.N. (1998). Which extractant should be used for the screening and isolation of antimicrobial components from plants, *Journal of Ethnopharmacology*; Lagos. 60: 1-6.
- Ediriweera, M.K.; Tennekoon, K.H.; Samarakoon, S.R. A Review on Ethnopharmacological Applications, Pharmacological Activities, and Bioactive Compounds of *Mangifera indica* (Mango). *Evid. Based Complement. Altern. Med.* **2017**, 2017, 1–24.
- Fafiolu, A.; Odugunawa, O.; Bambose, A.; Oso, A.; Isah, O.; Olantanji, J.; Jegede, A. Feeding value mango leaf (*Mangifera indica*) for growing rabbits. *J. Anim. Vet. Adv.* **2006**, 5, 800–804.
- Fontenelle, R.O.D.S.; Sobrinho, A.C.N.; Soares, B.V.; De Aguiar, F.L.L.; De Brito, E.H.S.; Cavalcante, C.S.D.P.; Rocha, M.F.G.; De Moraes, S.M. Effect of essential oils from *Mangifera indica* L. cultivars on the antifungal susceptibility of *Candida spp.* Strains isolated from dogs. *Rev. Bras. Saúde Produção Anim.* **2017**, 18, 337– 346.
- Garg, R., Perveen, S., Gupta, B., and Bajpai, V. K. (2015). Evaluation of Antibacterial Activity of *Annona Squamosa*, *Psidium Guajava* and *Azadirachta indica* against Pathogenic Bacterial Cultures.
- Gebara, S.S.; Ferreira, W.D.O.; Ré-Poppi, N.; Simionatto, E.; Carasek, E. Volatile compounds of leaves and fruits of *Mangifera indica* var. coquinho (*Anacardiaceae*) obtained using solid phase microextraction and hydrodistillation. *Food Chem.* **2011**, 127, 689–693.
- Grice, E.A. (2015). The intersection of microbiome and host at the skin interface: genomic- and metagenomic-based insights. *Genome Res.* **25**, 1514–1520.
- Gupta, S.C., Prasad, S., Tyagi, A.K.,Kunnumakkara, A. B., andAggarwal, B. B. (2017). Neem (*Azadirachta indica*): An Indian Traditional Panacea with Modern Molecular Basis. *Phytomedicine* 34, 14–20. doi:10.1016/j.phymed.2017.07.001
- Guo, L.; Gong, S.;Wang, Y.; Sun, Q.; Duo, K.; Fei, P. Antibacterial Activity of Olive Oil Polyphenol Extract Against *Salmonella Typhimurium* and *Staphylococcus aureus*: Possible Mechanisms. *Foodborne Pathog. Dis.* **2020**, 17, 396–403.
- Herrera- calderon, O; Ejazk; Wajid, M., Shehezade, M. C., Tinco-Jayo, J.A., EncisoRoca, E., Franco-Quino, C., Yuli-pasadas, R.A., & Chumpitazcerrate, V. (2019). *Azadirachta India: Antibacterial activity* of Neem against different strains of bacterial and their active constituents as preventive in various diseases. *Pharmacogn J*, 11 (11),1597-1604.
- Hamad, G. M., Mohdaly, A. A. A., El-Nogoumy, B. A., Ramadan, M. F., Hassan, S. A., and Zeitoun, A. M. (2021). Detoxification of Aflatoxin B1 and Ochratoxin A Using *Salvia farinacea* and *Azadirachta indica* Water Extract and Application in Meat Products. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 193 (10), 3098–3120. doi:10.1007/s12010-021-03581-1
- Hannan, A.; Asghar, S.; Naeem, T.; Ullah, M.I.; Ahmed, I.; Aneela, S.; Hussain, S. Antibacterial effect of mango (*Mangifera indica* Linn.) leaf extract against antibiotic sensitive and multi-drug resistant *Salmonella typhi*. *Pak. J. Pharm. Sci.* **2013**, 26, 715–719.
- Hussain, F., Khurshid, M. F., Masood, R., and Ibrahim, W. (2017). Developing Antimicrobial Calcium Alginate Fibres from Neem and Papaya Leaves Extract. *J. Wound Care* 26 (12), 778–783. doi:10.12968/jowc.2017.26.12.778

- Jawetz, M., Adelberg Brooks, G.F., Butel, J.S., and Morse, S.A. (2004). **Medical Microbiology**. 23rd edition. McGraw Hill Companies, Inc. Singapore. 818.
- Jung, J.-S.; Jung, K.; Kim, N.-H.; Kim, H.-S. Selective inhibition of MMP-9 gene expression by *mangiferin* in PMA-stimulated human astrogloma cells: Involvement of PI3K/Akt and MAPK signaling pathways. *Pharmacol. Res.* 2012, 66, 95–103.
- Kanwal, Q.; Hussain, I.; Siddiqui, H.L.; Javaid, A. Antifungal activity of flavonoids isolated from mango (*Mangifera indica* L.) leaves. *Nat. Prod. Res.* **2010**, 24, 1907–1914.
- Kulkarni, V.M.; Rathod, V.K. Extraction of mangiferin from *Mangifera indica* leaves using three phase partitioning coupled with ultrasound. *Ind. Crop. Prod.* **2014**, 52, 292–297.
- Kumar, M.; Saurabh, V.; Tomar, M.; Hasan, M.; Changan, S.; Sasi, M.; Maheshwari, C.; Prajapati U.; Singh, S.; Prajapat, R.K.; et al. Mango (*Mangifera indica* L.) Leaves: Nutritional Composition, Phytochemical Profile, and Health-Promoting Bioactivities. *Antioxidants* 2021, 10, 299. <https://doi.org/10.3390/antiox10020299>
- Kayode, A.A.A., & Kayode, O.T. (2011). Some medical values of *Telfairia occidentalis*: A review. *American Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 1, 30-38.
- Kabir, Y.; Shekhar, H.U.; Sidhu, J.S. Phytochemical Compounds in Functional Properties of Mangoes. In *Handbook of Mango Fruit*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2017; pp. 237–254.
- Konishi, K.; Adachi, H.; Ishigaki, N.; Kanamura, Y.; Adachi, I.; Tanaka, T.; Nishioka, I.; Nonaka, G.-I.; Horikoshi, I. Inhibitory Effects of Tannins on NADH Dehydrogenases of Various Organisms. *Biol. Pharm. Bull.* **1993**, 16, 716–718.
- Kowalska-Krochmal B, Dudek-Wicher R. (2021). The minimum inhibitory concentration of antibiotics: Methods, interpretation, clinical relevance. *Pathogens*; 10(2): 165.[<http://dx.doi.org/10.3390/pathogens10020165>]
- Kulkarni, V.M.; Rathod, V.K. Extraction of mangiferin from *Mangifera indica* leaves using three phase partitioning coupled with ultrasound. *Ind. Crop. Prod.* 2014, 52, 292–297.
- Lauricella, M.; Emanuele, S.; Calvaruso, G.; Giuliano, M.; D’Anneo, A. Multifaceted Health Benefits of *Mangifera indica* L. (Mango): The Inestimable Value of Orchards Recently Planted in Sicilian Rural Areas. *Nutrients* **2017**, 9, 525.
- Lessa, F.C., Nogueira, I., Vargas Fda S., Spolidorio, D.M., Hebling, J., García-Godoy, F. 2010. Direct and transdermal antibacterial activity of chlorhexidine. *American Journal of Dentistry*, 23: 255–9.
- Li LL, Liu N, Humphries EM, Yu JM, Li S, Lindsay BR, et al., (2016). Aetiology of diarrhoeal disease and evaluation of viral-bacterial coinfection in children under 5 years old in China: a matched case-control study. *Clin Microbiol Infect.* 2016;22(4):381 e9–e16. <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2015.12.018> PMID:26724990; PubMed Central PMCID: PMC4865875.
- Laulloo, S.J.; Bhowon, M.G.; Soyfoo, S.; Chua, L.S. Nutritional and Biological Evaluation of Leaves of *Mangifera indica* from *Mauritius*. *J. Chem.* **2018**, 2018, 1–9.
- Lu, X. F., Lin, P. C., Zi, J. C., and Fan, X. N. (2019). Limonoids from Seeds of *Azadirachta indica* and Their Antibacterial Activity. *Zhongguo Zhong Yao Za Zhi* 44 (22), 4864–4873. doi:10.19540/j.cnki.cjcmm.20190813.202
- Luca, S.V.; Macovei, I.; Bujor, A.; Miron, A.; Skalicka-Woźniak, K.; Aprotosoaie, A.C.; Trifan, A. Bioactivity of dietary polyphenols: The role of metabolites. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2020**, 60, 626–659.
- Mistry, K. S., Sanghvi, Z., Parmar, G., and Shah, S. (2014). The Antimicrobial Activity of *Azadirachta indica*, *Mimusops elengi*, *Tinospora cardifolia*, *Ocimum sanctum* and 2% Chlorhexidine Gluconate on Common Endodontic Pathogens: An In Vitro Study. *Eur. J. Dent.* 8 (2), 172–177. doi:10.4103/1305-7456.130591
- M, G.; U, V.N.; S, M.S.; R, A.K. Antimicrobial Activity of Some Medicinal Herbals. *Int. J. Biotech Trends Technol.* **2020**, 10, 56–59.
- Martens, E., and Demain, A. L. (2017). The Antibiotic Resistance Crisis, with a Focus on the United States. *J. Antibiot.* (Tokyo) 70 (5), 520–526. doi:10.1038/ja.2017.30

- Mada S.B., Garba A., Muhammad A., Mohammed A. and Adekunle D.O. Phytochemical Screening and Antimicrobial Efficacy of Aqueous and Methanolic Extract of *Mangifera indica* (Mango stem bark). *World Journal of Life Sciences and Medical Research* 2012;2(2):81-5.
- Mushore J and Matuvhunye T. (2013). Antibacterial properties of *mangifera indica* on *Staphylococcus aureus*. African journal of clinical and experimental microbiology *ajcem*/21312 COPYRIGHT 2013 may 2013 isbn 1595-689x. Vol 14(2) 2013 *afr. J. Cln. Exper. Microbiol* 14(2): 62-74 <http://dx.doi.org/10.4314/ajcem.v14i2.4>
- Moga, M.A., Balam, A., Anastasia, C.V., (2018). Domienescu, O.G., Necoloiu, C.D., & Gavri, C., (2018) An overview on the anticancer activity of *Azadirachta indica* (Neem) in gynaecological cancers. *Int J Mol Sci*, 19 (12), 3898.
- Martens, E., and Demain, A. L. (2017). The Antibiotic Resistance Crisis, with a Focus on the United States. *J. Antibiot.* (Tokyo) 70 (5), 520–526. doi:10.1038/ja.2017.30
- Masud Parvez, G.M. Pharmacological activities of mango (*Mangifera indica*): A review. *J. Pharmacogn. Phytochem.* **2016**, 5, 1–7.
- Matsuura, G.T. and Barg, N. (2013) Update on the Antimicrobial Management of Foot Infections in Patients with Diabetes. *Clinical Diabetes*, 31, 59-65. <https://doi.org/10.2337/diaclin.31.2.59>
- Morales-Covarrubias, M. S., García-Aguilar, N., Bolan-Mejía, M. D., and Puello-Cruz, A. C. (2016). Evaluation of Medicinal Plants and Colloidal Silver Efficiency against *Vibrio Parahaemolyticus* Infection in *Litopenaeus Vannamei* Cultured at Low Salinity. *Dis. Aquat. Organ* 122 (1), 57–65. doi:10.3354/dao03060
- Noor, A. A. (2011). Dose Response Curve of Plants Extracts against the Human Pathogens. *Gomal Univ. J. Res.* 27 (2).
- Ncube, N.S., Afolayan, A.J and Okoh, A. (2007). Assessment techniques of antimicrobial properties of natural compounds of plant origin: Current methods and future trends, *African Journal of biotechnology* **7**(12): 1797-1806.
- Ochei J, Kolhatkar A. **Medical laboratory science: theory and practice**. 7thEdn. Tata Macraw-Hill Publishing Limited, New Delhi. 2008;801-812.
- Olayinka, A.T., Onile, B.A. and Olayinka, B.O. (2004) Prevalence of Multi-Drug Resistant (MDR) *Pseudomonas aeruginosa* Isolates in Surgical Units of Ahmadu Bello University Teaching Hospital, Zaria, Nigeria: An Indication for Effective Control Measures. *Annals of African Medicine* , 1, 13-16.
- Owusu E., Ahorlu M. M., Afutu E., Akumwena A., Asare G. A. Antimicrobial activity of selected medicinal plants from a sub-saharan african country against bacterial pathogens from post-operative wound infections *J Med Sci* 2021; 9(23): 1-16. [<http://dx.doi.org/10.3390/medsci9020023>]
- Olajuyigbe, O.O. and Afolayan, A.J. (2012). Antimicrobial potency of the ethanolic crude bark extract of *Ziziphus mucronata* wild.subsp.mucronata wild. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*. Pretoria. **6**(10), 724-730.
- Ouf, S.A.; Galal, A.M.F.; Ibrahim, H.S.; Hassan, A.Z.; Mekhael, M.K.G.; El-Yasergy, K.F.; El-Ghany, M.N.A.; Rizk, M.A.; Hanna, A.G. Phytochemical and antimicrobial investigation of the leaves of five Egyptian mango cultivars and evaluation of their essential oils as preservatives materials. *J. Food Sci. Technol.* **2020**, 1–13.
- Okwu, D.E.; Ezenagu, V.I.T.U.S. Evaluation of the phytochemical composition of mango (*Mangifera indica* Linn) stem bark and leaves. *Int. J. Chem. Sci.* **2008**, 6, 705– 716.
- Pretorious JC, Magama S, Zietsman PC. Growth inhibition of plant pathogenic bacteria and fungi by extracts from selected South African plant species. *South African Journal of Botany*. 2003; 20:188-192.
- Princwill-Ogbonna, I.; Ogbonna, P.; Ogujiofor, I. Proximate Composition, Vitamin, Mineral and biologically Active Compounds Levels in Leaves of *Mangifera indica* (Mango), *Persea americana* (Avocado pea), and *Annona muricata* (Sour sop). *J. Appl. Sci. Environ.Manag.* **2019**, 23, 65.
- Paulino, L. C., Tseng, C. H., Strober, B. E. & Blaser, M. J, ((2006). Molecular analysis of fungal microbiota in samples from healthy human skin and psoriatic lesions. *J. Clin. Microbiol.* **44**, 2933–2941.

- Rameshkumar KB, George V, Shiburaj S (2007). “Chemical constituents and antibacterial activity of the leaf oil of *Cinnamomum chemungianum* Mohan et Henry,” *Journal of Essential Oil Research*, 19(1): pp98–100.
- Raju, D., and Jose, J. (2019). Development and Evaluation of Novel Topical Gel of Neem Extract for the Treatment of Bacterial Infections. *J. Cosmet. Dermatol* 18 (6), 1776–1783. doi:10.1111/jocd.12965
- Ruangpan, L. and E.A. Tendencia (2004). **Laboratory manual of standardized methods for antimicrobial sensitivity tests for bacteria isolated from aquaculture**. Southeast Asian Fisheries Development Center, Aquaculture Department, Iloilo, Philippines.55 p.
- Rodrigues,M. P., Astoreca,A. L., Oliveira,Á.A., Salvato, L. A., Biscoto,G. L., Keller, L.A. M., et al. (2019). In Vitro Activity of Neem (*Azadirachta indica*) Oil on Growth and Ochratoxin A Production by *Aspergillus carbonarius* Isolates. *Toxins* (Basel) 11(10). doi:10.3390/toxins11100579
- Rasouli, H.; Farzaei, M.H.; Khodarahmi, R. Polyphenols and their benefits: A review. *Int. J. Food Prop.* **2017**, 20, 1–42.
- S, L. P., A, U., and S J,G. F. (2020). Investigation on the BiofilmEradication Potential of Selected Medicinal Plants against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*. *Biotechnol. Rep.* (Amst) 28, e00523. doi:10.1016/j.btre.2020.e00523
- Saleem, S., Muhammad, G., Hussain, M. A., and Bukhari, S. N. A. (2018). A Comprehensive Review of Phytochemical Profile, Bioactives for Pharmaceuticals, and Pharmacological Attributes of *Azadirachta indica*. *Phytother. Res.* 32 (7),1241–1272. doi:10.1002/ptr.6076
- Suleiman, M.M., Ogah, I.J., Okobia, B., Adeyemi, O.A., Olatunji, K.T. and Ige, I.M. (2016). A review on the antibacterial properties of extracts from *Psidium* spp and the effects of the extraction solvents. *Pakistan Journal of Medicine and Dentistry* 5(3), 47-56.
- Singh, S., Singh, J.P., Yadav, S.K., Ramakant, Yadav, V., Kumar, R., & Joshi, R.K. (2021). Antibigram Pattern of Common Plant Leaves against *E. coli*, *Staphylococcus aureus* and Whole Milk Culture. *Ind J Vet Sci and Biotech*, 17(1): 1-4.
- Stefanello EA, Cervi AC, Ito IY, Salvador MJ, Wisniewski Jr A, Simionatto EL (2008). “Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils of *Eugenia chlorophylla* (Myrtaceae),” *Journal of Essential Oil Research*, 20(1): pp75–78.
- Streicher, L. M. (2021). Exploring the Future of Infectious Disease Treatment in a Postantibiotic Era: A Comparative Review of Alternative Therapeutics. *J. Glob. Antimicrob. Resist* 24, 285–295. doi:10.1016/j.jgar.2020.12.025
- Streicher, L. M. (2021). Exploring the Future of Infectious Disease Treatment in a Postantibiotic Era: A Comparative Review of Alternative Therapeutics. *J. Glob. Antimicrob. Resist* 24, 285–295. doi:10.1016/j.jgar.2020.12.025
- Shah, K.A.; Patel, M.B.; Patel, R.J.; Parmar, P.K. *Mangifera indica* (Mango). *Pharmacogn. Rev.* **2010**, 4, 42–48.
- Sani, R.A., Garba, S.A. and Oyewole, O.A. (2012) Antibiotic Resistance Profile of GramNegative Bacteria Isolated from Surgical Wounds in Minna, Bida, Kontagora and Suleja Areas of Niger State. *American Journal of Medicine and Medical Sciences*, 2, 20-24. <https://doi.org/10.5923/j.ajmms.20120201.05>
- Sonalkar, M., Nitave, Y., Sachin, A., & Kagalkar, A.A. (2014). Review on Neem plant. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(4), 590-598.
- Singh, V., Roy, M., Garg, N., Kumar, A., Arora, S., and Malik, D. S. (2021). An Insight into the Dermatological Applications of Neem: A Review on Traditional and Modern Aspect. *Recent Adv. Antiinfect Drug Discov.* 16 (2), 94–121. doi:10.2174/ 2772434416666210604105251
- Sunthar, T. P. M., Marin, E., Boschetto, F., Zanicco, M., Sunahara, H., Ramful, R., et al. (2020). Antibacterial and Antifungal Properties of Composite Polyethylene Materials Reinforced with Neem and Turmeric. *Antibiot. (Basel)* 9 (12). doi:10.3390/antibiotics9120857

- Sultana, B., Naseer, R., and Nigam, P. (2015). Utilization of Agro-Wastes to Inhibit Aflatoxins Synthesis by *Aspergillus parasiticus*: A Biotreatment of Three Cereals for Safe Long-Term Storage.
- Tajkarimi MM, Ibrahim SA, Cliver DO (2010). "Antimicrobial herb and spice compounds in food." *Food Control*, 21(9): pp1199–1218.
- Uzor C. A., and Dick A. A. (2023). Antibacterial Efficacy of Extracts from Leaves of Mango (*Mangifera indica*) and Guava (*Psidium guajava* L). Vol. 10(4) Pp. 28-32, June 2023 ISSN: 2449-0814 DOI: <https://doi.org/10.26765/DRJHP20507130> Article Number DRJHP20507130
- Uwimbabazi, F., Uwimana, J., & Rutanga, J.P. (2015). Assessment of antibacterial activity of Neem plant (*Azadirachta indica*) on *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 3(4), 85-91.
- Udosen, I. E. (2018). **Basic Techniques in Microbiology**. First Edition. Finix Publications Bauchi, Bauchi State. Pp 121-187.
- Vaghasiya Y, Chanda SV (2007). Screening of methanol and acetone extracts of fourteen Indian medicinal plants for antimicrobial activity. *Turk. J. Biol.* 31: 243-248.
- Vaghasiya Y., Patel H. and Chanda S. (2011). Antibacterial activity of *Mangifera indica* L. seeds against some human pathogenic bacterial strains. *African Journal of Biotechnology* Vol. 10(70), pp. 15788-15794, 9 November. <http://www.academicjournals.org/AJB> DOI: 10.5897/AJB10.632 ISSN 1684– 5315
- Wang, C. H., Hsieh, Y.H., Powers, Z.M., and Kao, C. Y. (2020). Defeating Antibiotic Resistant Bacteria: Exploring Alternative Therapies for a Post-Antibiotic Era. *Int. J. Mol. Sci.* 21 (3). doi:10.3390/ijms21031061
- Wylie M.R., and Merrell D.S (2022) The Antimicrobial Potential of the Neem Tree *Azadirachta indica*. *Front. Pharmacol.* 13:891535. doi: 10.3389/fphar.2022.891535
- Wetungu, M.; Tarus, P.; Segor, F.; Cheseto, X.; Omolo, M. Essential oil chemistry of some *Mangifera indica* varieties from Kenya. *Am. J. Essent. Oils Nat. Prod.* **2015**, 3, 1–6.
- Younus, I., Siddiq, A., Ishaq, H., Anwer, L., Badar, S., and Ashraf, M. (2016). Evaluation of Antiviral Activity of Plant Extracts against Foot and Mouth Disease Virus In Vitro. *Pak J. Pharm. Sci.* 29 (4), 1263–1268.
- Zhang, Y.; Chen, Q.; Liu, M.-Y.; Ruan, J.-Y.; Yu, H.-Y.; Li, J.; Wang, T. Effects of Benzophenones from Mango Leaves on Lipid Metabolism. *Chem. Pharm. Bull.* **2019**, 67, 634–639.

**RECENT ADVANCES IN NEUROMORPHIC PHOTODETECTORS FOR ARTIFICIAL
VISION AND IN-SENSOR COMPUTING**

İpek BALNAN

Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences,
Department of Engineering Basic Sciences, Sivas-Türkiye

Email: balnanipek@sivas.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1150-651X>

Abstract

The rapid advancement of artificial intelligence, machine vision, and edge computing technologies has exposed the limitations of conventional von Neumann architectures in terms of data transfer efficiency and energy consumption. Inspired by the human visual system, neuromorphic photodetectors offer an innovative solution by integrating light sensing, data storage, and information processing functionalities within a single device. This review discusses the fundamental operating principles of neuromorphic photodetectors, optoelectronic synaptic mechanisms, and in-sensor computing approaches. Various material platforms, including two-dimensional materials, perovskites, metal oxides, quantum dots, organic semiconductors, and ferroelectric materials, are examined regarding their roles in neuromorphic photodetection. Recent developments in artificial retina systems, image recognition, robotics, autonomous vehicles, and edge artificial intelligence applications are highlighted, while current challenges such as device stability, scalability, and CMOS compatibility are critically analyzed. Finally, future research directions are presented toward the development of energy-efficient and intelligent vision technologies that more closely emulate biological visual systems.

Keywords: Neuromorphic Photodetectors, Artificial Vision Systems, In-Sensor Computing, Optoelectronic Synapses

Introduction

The rapid development of artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), machine vision, and edge computing has created an increasing demand for intelligent sensing systems capable of processing massive amounts of visual information efficiently. Conventional image sensing systems are generally based on the von Neumann computing architecture, in which sensing, memory, and data processing are physically separated. As image resolution and computational complexity continue to increase, frequent data transfer between these independent units results in high latency, excessive energy consumption, and limited processing efficiency. This challenge, commonly referred to as the *von Neumann bottleneck*, has become one of the major obstacles to the realization of next-generation intelligent vision systems (Zou et al., 2021; Xu & Jin, 2023).

In contrast to conventional electronic systems, the human visual system performs image sensing, information preprocessing, memory formation, and decision-making simultaneously through highly interconnected neural networks. The retina is not merely a photosensitive organ; it also performs substantial preprocessing of visual signals before transmitting compressed information to the visual cortex. This biological architecture enables extremely fast and energy-efficient visual perception while consuming only a small amount of power. Consequently, biological vision has become an important source of inspiration for developing neuromorphic electronic devices that emulate neural information processing (Roy et al., 2019; Wan et al., 2022).

The conceptual relationship between the biological visual system and the artificial neuromorphic vision architecture is illustrated (Figure 1). The comparison highlights how biological visual information processing inspires the development of neuromorphic photodetectors capable of integrating sensing, memory, and computation within a single hardware platform.

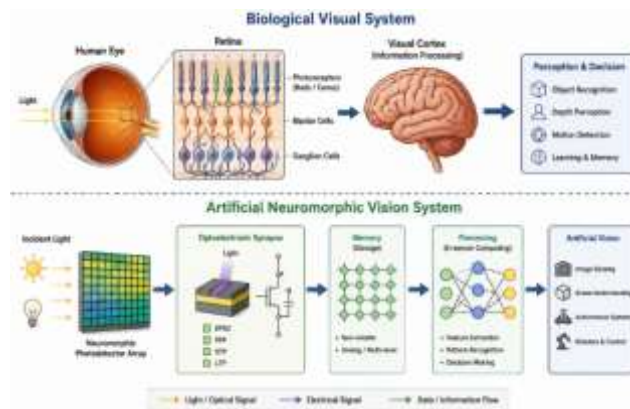


Figure 1. Schematic illustration of biological visual information processing and neuromorphic vision architecture (*Created by the author*).

Neuromorphic photodetectors (NPDs) have recently emerged as one of the most promising technologies for hardware-based artificial vision. Unlike conventional photodetectors that only convert optical signals into electrical outputs, neuromorphic photodetectors integrate light detection, memory storage, and information processing within a single device. This multifunctional operation allows optical information to be processed directly at the sensor level without continuous communication with external memory or processors. Such an approach significantly reduces energy consumption and computational delay, making neuromorphic photodetectors highly attractive for real-time image processing and edge artificial intelligence applications (Chen et al., 2023).

The operating mechanism of neuromorphic photodetectors is inspired by biological synapses, where synaptic connection strength changes according to previous external stimuli. Similarly, optoelectronic synaptic devices exhibit persistent conductance modulation under optical stimulation, enabling the emulation of biological learning and memory behaviors. Typical synaptic characteristics include excitatory postsynaptic current (EPSC), paired-pulse facilitation (PPF), short-term plasticity (STP), long-term plasticity (LTP), and spike-timing-dependent plasticity (STDP). These functionalities enable artificial devices to recognize, memorize, and process visual information without relying exclusively on software-based neural network algorithms (Guo et al., 2023; Wang et al., 2024).

Recent progress in nanomaterials has further accelerated the development of neuromorphic photodetectors. Various material platforms, including two-dimensional (2D) layered materials, metal oxide semiconductors, halide perovskites, quantum dots, organic semiconductors, and ferroelectric materials, have demonstrated excellent optoelectronic and synaptic properties. Two-dimensional semiconductors such as MoS₂, WS₂, WSe₂, and graphene exhibit excellent electrostatic control, high carrier mobility, and strong light-matter interaction, making them attractive for artificial synaptic devices. Halide perovskites possess high optical absorption coefficients and long carrier diffusion lengths, while ferroelectric materials provide stable non-volatile polarization that can significantly enhance optical memory performance. These material systems offer different advantages depending on the targeted neuromorphic application (Wan et al., 2022; Zhao et al., 2023).

In addition to material innovations, significant progress has been achieved in device architectures and system integration. Phototransistors, memristors, floating-gate transistors, photomemories, and heterostructure-based devices have been successfully employed to mimic biological synaptic behavior. More recently, these devices have been integrated into artificial retina systems capable of performing image preprocessing, pattern recognition, motion detection, and adaptive visual learning directly within the sensing hardware. Such in-sensor computing architectures substantially reduce data movement and improve computational efficiency, providing an effective solution for edge AI systems, autonomous vehicles, intelligent robotics, wearable electronics, and smart surveillance technologies (Zhang et al., 2025).

Despite these remarkable achievements, several challenges still hinder the large-scale implementation of neuromorphic photodetectors. Device stability under long-term operation, fabrication reproducibility, large-area manufacturing, CMOS compatibility, response speed, and environmental durability remain critical issues that require further investigation. Moreover, balancing high photoresponsivity, fast response time, low operating voltage, and reliable synaptic behavior within a single device continues to be an important research objective (Chen et al., 2023; Wang et al., 2024).

Therefore, this paper reviews recent advances in neuromorphic photodetectors for artificial vision and in-sensor computing. The fundamental operating principles of neuromorphic photodetectors are first introduced, followed by an overview of major material platforms and their synaptic characteristics. Subsequently, recent developments in artificial vision systems and in-sensor computing are discussed, while current challenges and future research directions are critically evaluated. This review aims to provide a concise overview of the latest progress in neuromorphic photodetection and highlight its potential for next-generation intelligent optoelectronic systems.

1. Materials and Methods

This study was conducted as a comprehensive literature review to evaluate recent developments in neuromorphic photodetectors for artificial vision and in-sensor computing. Relevant publications were collected from internationally recognized scientific databases, including **Web of Science**, **Scopus**, **IEEE Xplore**, **ScienceDirect**, **SpringerLink**, and **Google Scholar**. The literature search focused primarily on studies published between **2020 and 2025**, although several highly cited earlier publications were also included to provide the necessary theoretical background.

The search was performed using combinations of keywords such as *neuromorphic photodetectors*, *artificial vision*, *optoelectronic synapse*, *in-sensor computing*, *neuromorphic vision*, *edge artificial intelligence*, *photonic computing*, *memristor*, *two-dimensional materials*, and *perovskite photodetectors*. The collected publications were screened according to their relevance to the scope of this review, with particular emphasis placed on recent advances in device architecture, material platforms, synaptic characteristics, and artificial vision applications.

After the initial screening process, approximately twenty high-quality journal articles and review papers published in leading journals, including *Advanced Science*, *Advanced Materials*, *Nano-Micro Letters*, *ACS Nano*, *Advanced Functional Materials*, *Nature Reviews Electrical Engineering*, *Micromachines*, and *Science and Technology of Advanced Materials*, were selected for detailed analysis. Conference papers with limited experimental details and duplicate publications were excluded to ensure the reliability and consistency of the reviewed literature.

The selected studies were comparatively evaluated according to several criteria, including material type, device configuration, operating mechanism, photoresponse characteristics, synaptic behavior,

application field, and reported advantages and limitations. Particular attention was given to the capability of neuromorphic photodetectors to integrate optical sensing, memory storage, and information processing within a single hardware platform. The reviewed literature was subsequently categorized into four major topics: (i) fundamental operating principles of neuromorphic photodetectors, (ii) material platforms, (iii) artificial vision and in-sensor computing applications, and (iv) current challenges and future perspectives. This classification provides a structured overview of the state-of-the-art developments and highlights emerging research directions in neuromorphic optoelectronics.

2. Findings and Discussion

3.1 Fundamentals of Neuromorphic Photodetectors

Neuromorphic photodetectors (NPDs) represent a new generation of optoelectronic devices that combine light detection, memory, and information processing within a single hardware platform. Unlike conventional photodetectors, which only convert incident photons into electrical signals, NPDs are capable of storing and processing optical information in a manner analogous to biological synapses. This integrated functionality enables artificial visual systems to perform image perception and preliminary data processing directly at the sensor level, significantly reducing data transfer between sensing, memory, and computing units (Wan et al., 2022; Wang et al., 2024).

The design of neuromorphic photodetectors is inspired by the human visual system. In biological vision, incoming light is first detected by photoreceptor cells located in the retina. Instead of transmitting all visual information directly to the brain, the retina performs several preprocessing tasks, including contrast enhancement, edge detection, motion perception, and noise suppression. The processed information is then transmitted through interconnected neurons to the visual cortex, where higher-level cognitive functions occur. This highly parallel processing architecture enables extremely fast visual recognition while maintaining remarkably low energy consumption (Roy et al., 2019).

Similarly, neuromorphic photodetectors integrate sensing and computing into a single device by mimicking the behavior of biological synapses. Optical stimuli induce changes in the electrical conductance of the device, allowing it to retain information even after the illumination is removed. These persistent conductance changes form the basis of artificial memory and learning. Consequently, NPDs can recognize optical patterns, memorize previous stimuli, and gradually adapt their responses according to repeated optical excitation, closely resembling biological learning processes (Chen et al., 2023).

One of the most important characteristics of neuromorphic photodetectors is their ability to emulate synaptic plasticity. Synaptic plasticity refers to the capability of biological synapses to modify their connection strength according to external stimuli, forming the fundamental mechanism of learning and memory in the human brain. In artificial optoelectronic synapses, similar behaviors are achieved through light-induced carrier trapping, charge accumulation, ion migration, ferroelectric polarization, or resistive switching mechanisms depending on the device architecture and material system (Guo et al., 2023).

Among the various synaptic functions, the **excitatory postsynaptic current (EPSC)** is one of the most widely investigated. EPSC describes the transient increase in electrical current immediately after an optical stimulus is applied. As the optical pulse ends, the current gradually decreases due to carrier recombination and charge relaxation. The decay characteristics of EPSC provide valuable information regarding the memory capability of the device and are commonly used to evaluate synaptic performance (Wang et al., 2024).

Another important synaptic behavior is **paired-pulse facilitation (PPF)**. In biological neural systems, two consecutive stimuli separated by a short time interval generate a stronger second response because residual ions remain within the synaptic junction. Neuromorphic photodetectors reproduce this phenomenon through incomplete carrier recombination or charge trapping. A larger second photocurrent indicates effective temporal information processing and demonstrates the ability of the device to retain short-term optical memory (Wan et al., 2022).

Neuromorphic devices also exhibit **short-term plasticity (STP)** and **long-term plasticity (LTP)**. STP corresponds to temporary conductance modulation that gradually disappears after the external stimulus is removed, whereas LTP represents stable conductance changes maintained for extended periods following repeated optical stimulation. The transition from STP to LTP is generally achieved by increasing either the intensity, duration, or repetition frequency of incident light pulses. This behavior closely resembles the biological learning process, where repeated experiences strengthen neural connections and facilitate long-term memory formation (Chen et al., 2023; Guo et al., 2023).

Recent studies have additionally demonstrated more sophisticated synaptic functions such as spike-duration-dependent plasticity (SDDP), spike-number-dependent plasticity (SNDP), and spike-timing-dependent plasticity (STDP). These learning mechanisms enable artificial visual systems to encode temporal information and improve recognition accuracy for dynamic visual scenes. Such characteristics are particularly valuable for intelligent robotics, autonomous vehicles, and event-based vision systems that require rapid adaptation to continuously changing environments (Zhang et al., 2025).

The integration of optical sensing, non-volatile memory, and neuromorphic information processing within a single device significantly reduces computational complexity compared with conventional vision systems. Instead of transferring large volumes of raw image data to external processors, neuromorphic photodetectors perform preliminary feature extraction directly during image acquisition. This in-sensor processing strategy minimizes latency, decreases power consumption, and enables real-time decision making, making NPDs promising candidates for future edge artificial intelligence hardware.

As illustrated in the operating mechanism of a MoS₂-based neuromorphic photodetector (Figure 2), the device operates through a sequence of interconnected processes beginning with incident light absorption and photogenerated carrier formation. The generated electron-hole pairs subsequently undergo charge modulation through mechanisms such as charge trapping/detrapping, ion migration, ferroelectric polarization, or phase transition, depending on the device architecture. These processes induce conductance modulation that gives rise to synaptic behaviors, including excitatory postsynaptic current (EPSC), paired-pulse facilitation (PPF), short-term plasticity (STP), and long-term plasticity (LTP). The resulting conductance states enable optical information to be stored and processed within the device, allowing memory, learning, feature extraction, pattern recognition, and decision-making to be performed directly at the hardware level. Consequently, MoS₂-based neuromorphic photodetectors integrate optical sensing, memory, and information processing into a single platform, making them promising candidates for low-power artificial vision and in-sensor computing applications (Roy et al., 2019; Chen et al., 2023; Wang et al., 2024).



Figure 2. Working principle of NPDs (*Created by the author*).

3.2 Material Platforms for Neuromorphic Photodetectors

The remarkable progress in neuromorphic photodetectors has been largely driven by the development of advanced semiconductor materials with excellent optoelectronic and memory characteristics. Unlike conventional photodetectors, neuromorphic devices require materials capable of not only generating photocurrent under light illumination but also retaining photoinduced information for subsequent processing. Consequently, extensive research has focused on material systems exhibiting high photoresponsivity, efficient charge trapping, long carrier lifetime, and stable synaptic behavior (Wan et al., 2022; Wang et al., 2024).

Among the various candidates, **two-dimensional (2D) materials** have attracted considerable attention because of their atomically thin structures, tunable electronic properties, and strong light-matter interactions. Materials such as graphene, MoS₂, WS₂, WSe₂, and black phosphorus provide high carrier mobility and excellent electrostatic control, making them ideal for optoelectronic synaptic devices. In particular, transition metal dichalcogenides (TMDs) exhibit suitable bandgaps for visible and

near-infrared photodetection while offering low operating voltage and high sensitivity. Their large surface-to-volume ratio also facilitates charge trapping, which is essential for achieving persistent photoconductivity and synaptic plasticity (Guo et al., 2023).

Another rapidly developing material family is **halide perovskites**. Owing to their outstanding optical absorption coefficients, long carrier diffusion lengths, and low-cost solution-processable fabrication methods, perovskites have demonstrated remarkable performance in neuromorphic optoelectronic devices. Their intrinsic ionic migration behavior naturally supports optical memory effects, allowing efficient implementation of learning and memory functions under optical stimulation. Furthermore, the tunable bandgap of perovskites enables wavelength-selective photodetection for artificial visual systems operating across a broad spectral range (Chen et al., 2023).

Metal oxide semiconductors, including ZnO, TiO₂, WO₃, IGZO, and SnO₂, have also emerged as promising materials because of their excellent environmental stability, simple fabrication techniques, and compatibility with complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS) technology. Oxygen vacancies and defect states in these materials provide efficient carrier trapping centers, enabling stable photoinduced conductance modulation. Consequently, metal oxide-based neuromorphic photodetectors have demonstrated reliable synaptic functions together with long operational lifetimes, making them attractive for large-area integrated artificial vision systems (Zhao et al., 2023).

In addition to inorganic semiconductors, **quantum dots (QDs)** and **organic semiconductors** have received increasing attention. Quantum dots exhibit size-dependent optical properties and strong quantum confinement effects, allowing highly tunable spectral responses. Organic semiconductors offer mechanical flexibility, lightweight structures, and low-temperature fabrication, making them suitable for wearable artificial vision devices and flexible neuromorphic electronics. Although their carrier mobility is generally lower than that of inorganic materials, continuous improvements in molecular engineering have significantly enhanced their optoelectronic performance (Wang et al., 2024).

Recently, **ferroelectric materials** have become another important research direction owing to their spontaneous polarization and non-volatile memory characteristics. Ferroelectric polarization creates stable internal electric fields that effectively separate photogenerated electron–hole pairs and prolong carrier lifetime. As a result, ferroelectric-assisted neuromorphic photodetectors exhibit enhanced optical memory, low energy consumption, and highly stable synaptic behavior. These advantages make them particularly attractive for next-generation in-sensor computing systems requiring long-term information retention (Zhang et al., 2025).

As illustrated, each material platform possesses distinct advantages and limitations depending on the targeted application (Figure 3). Two-dimensional materials provide superior carrier transport and ultrafast response speed, whereas perovskites offer exceptional light absorption and wavelength tunability. Metal oxides are preferred for their stability and CMOS compatibility, while quantum dots, organic semiconductors, and ferroelectric materials enable specialized functionalities such as spectral selectivity, mechanical flexibility, and non-volatile optical memory. Therefore, selecting an appropriate material platform remains one of the most critical considerations in designing high-performance neuromorphic photodetectors.

Before comparing these materials in detail, their major characteristics are summarized, highlighting their advantages, limitations, and representative applications in neuromorphic vision systems (Table 1).

Table 1. Comparison of material platforms used in neuromorphic photodetectors.

Material Platform	Major Advantages	Limitations	Representative Applications
2D Materials (MoS ₂ , WS ₂ , WSe ₂ , Graphene)	High mobility, strong light-matter interaction, ultrathin structure	Large-area fabrication challenges	Artificial retina, phototransistors
Perovskites	High absorption coefficient, tunable bandgap, solution processing	Moisture and thermal instability	Artificial vision, image sensing
Metal Oxides	High stability, CMOS compatibility, low fabrication cost	Lower carrier mobility	Edge AI, integrated sensors
Quantum Dots	Tunable spectral response, quantum confinement	Surface defects, long-term stability	Multispectral photodetection
Organic Semiconductors	Flexibility, lightweight, printable electronics	Low mobility	Wearable vision systems
Ferroelectric Materials	Non-volatile memory, polarization-assisted carrier separation	Complex fabrication	Optical memory, in-sensor computing

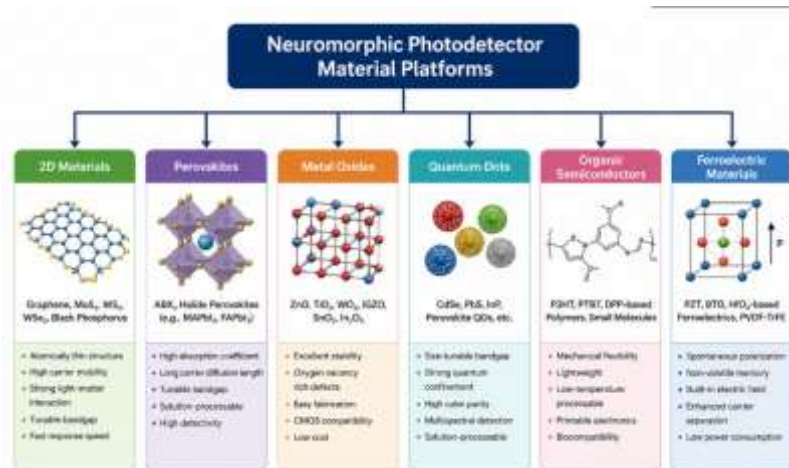


Figure 3. Classification of material platforms (2D, Perovskite, Metal Oxide, QDs, Organic, Ferroelectric) (Created by the author).

3.3 In-Sensor Computing

One of the most significant advantages of neuromorphic photodetectors is their ability to perform in-sensor computing, where optical sensing, memory storage, and preliminary information processing occur within the same device. Unlike conventional vision systems, which continuously transfer large volumes of image data from image sensors to external processors, neuromorphic photodetectors process visual information directly at the sensing stage. This approach substantially reduces data movement, computational latency, and power consumption, making it highly suitable for edge artificial intelligence (AI) applications (Chen et al., 2023; Xu & Jin, 2023).

Traditional electronic vision systems follow the von Neumann architecture, in which sensing, memory, and computation are physically separated. As image resolution increases, enormous amounts of visual data must be repeatedly transferred between these individual units. This frequent data exchange

creates the well-known *von Neumann bottleneck*, limiting processing speed while significantly increasing energy consumption. As illustrated, in-sensor computing eliminates much of this unnecessary data transfer by integrating sensing and computation into a single hardware platform (Figure 4). Consequently, neuromorphic photodetectors provide a more efficient architecture for real-time image processing and intelligent visual perception.

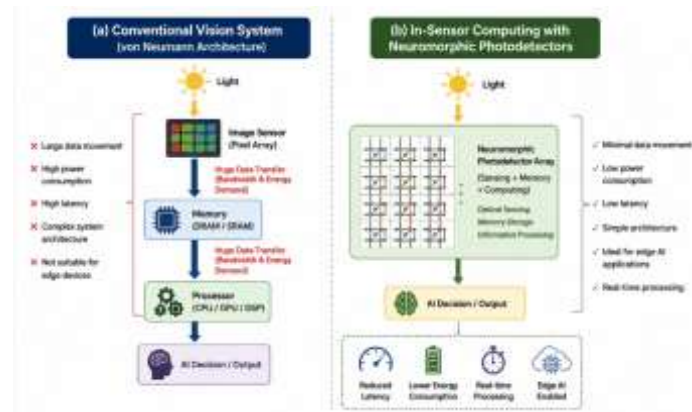


Figure 4. Comparison between the conventional von Neumann architecture and the in-sensor computing architecture employed by neuromorphic photodetectors (*Created by the author*).

Recent studies have demonstrated that in-sensor computing can dramatically improve the efficiency of artificial intelligence systems by reducing the number of computational steps required for image recognition. Instead of transmitting raw image data to external processors, neuromorphic photodetectors perform preliminary feature extraction during image acquisition. Edge detection, contrast enhancement, motion recognition, and temporal information encoding can therefore be completed directly within the sensing hardware before the information reaches higher-level neural networks (Wan et al., 2022).

The implementation of optoelectronic synaptic functions further enhances the computational capability of in-sensor systems. Light-induced conductance modulation enables each photodetector to simultaneously function as a photosensor and an artificial synapse. Consequently, arrays of neuromorphic photodetectors can perform parallel image processing while storing previously acquired optical information. This integrated operation closely resembles the distributed information processing mechanism observed in the biological retina and significantly improves computational efficiency (Wang et al., 2024).

Another important advantage of in-sensor computing is its compatibility with edge AI systems. Modern autonomous platforms—including self-driving vehicles, intelligent surveillance systems, wearable healthcare devices, and mobile robotics—require rapid decision-making with limited computational resources. Since neuromorphic photodetectors perform substantial preprocessing locally, the amount of data transmitted to cloud servers or external processors is greatly reduced. This not only decreases communication latency but also lowers overall energy consumption, making neuromorphic vision systems particularly attractive for battery-powered and resource-constrained applications (Zhang et al., 2025).

Despite these advantages, several challenges remain before large-scale implementation of in-sensor computing becomes feasible. Device-to-device variation, limited fabrication reproducibility, integration with existing CMOS technology, and long-term operational stability continue to restrict commercial deployment. Furthermore, balancing high photoresponsivity, fast response speed, and stable synaptic behavior within large photodetector arrays remains an active area of research. Continuous improvements in material engineering, device fabrication, and system integration are therefore expected to accelerate the practical implementation of neuromorphic in-sensor computing technologies in future intelligent vision systems.

3.4 Artificial Vision Applications

The integration of neuromorphic photodetectors with artificial intelligence has significantly expanded their application potential in modern intelligent vision systems. By combining optical sensing, memory storage, and information processing within a single device, neuromorphic photodetectors enable efficient visual perception with substantially reduced energy consumption. These capabilities have positioned neuromorphic vision technologies as promising candidates for next-generation edge computing systems, where fast decision-making and low-power operation are essential (Zhang et al., 2025).

One of the most representative applications is the development of **artificial retina systems**. Similar to the biological retina, neuromorphic photodetectors can preprocess optical information before transmitting it to higher computational layers. Functions such as edge detection, contrast enhancement, motion recognition, and adaptive brightness perception can be performed directly within the sensing hardware. This significantly decreases the amount of redundant visual information that must be processed by external computing units, improving both computational efficiency and response speed (Wan et al., 2022).

Neuromorphic vision devices have also demonstrated considerable potential in **robotics**. Autonomous robots continuously interact with dynamic environments and require rapid visual feedback for navigation and object manipulation. Conventional vision systems often suffer from computational delays due to the large amount of image data that must be transferred between sensors and processors. In contrast, neuromorphic photodetectors perform preliminary image analysis locally, enabling faster environmental perception while reducing energy consumption. These characteristics make them particularly attractive for autonomous mobile robots operating under limited computational resources (Chen et al., 2023).

Another rapidly growing application area is **autonomous driving**. Modern self-driving vehicles employ multiple cameras and optical sensors to monitor surrounding traffic conditions in real time. Processing these high-resolution visual data streams requires substantial computational power using conventional hardware. Neuromorphic photodetectors offer an alternative solution by integrating sensing and preprocessing within the same device, allowing important visual features such as moving objects, lane boundaries, pedestrians, and traffic signs to be detected more efficiently. Consequently, in-sensor computing architectures can improve both processing speed and system reliability for autonomous transportation (Xu & Jin, 2023).

Image recognition and intelligent surveillance represent another important field of application. Neuromorphic photodetectors can selectively respond to dynamic optical events while suppressing redundant background information. This event-driven sensing strategy considerably reduces unnecessary data acquisition and enables continuous monitoring with lower power consumption. Such systems are particularly beneficial for smart city infrastructure, security monitoring, industrial inspection, and environmental observation, where long-term autonomous operation is required (Wang et al., 2024).

Wearable electronics and biomedical devices have also benefited from recent advances in neuromorphic optoelectronics. Flexible photodetectors fabricated using organic semiconductors or two-dimensional materials can conform to curved surfaces while maintaining stable synaptic characteristics. These devices provide opportunities for intelligent healthcare monitoring, visual prostheses, human-machine interfaces, and portable diagnostic systems that require lightweight, energy-efficient operation (Guo et al., 2023).

The broad application areas of neuromorphic photodetectors are summarized (Figure 5). As illustrated, artificial retina systems, intelligent robotics, autonomous vehicles, image recognition, wearable electronics, and edge AI platforms represent the primary research directions currently driving the development of neuromorphic vision technologies. The continuous integration of advanced material platforms with artificial intelligence algorithms is expected to further enhance the performance and commercial potential of these emerging optoelectronic systems.

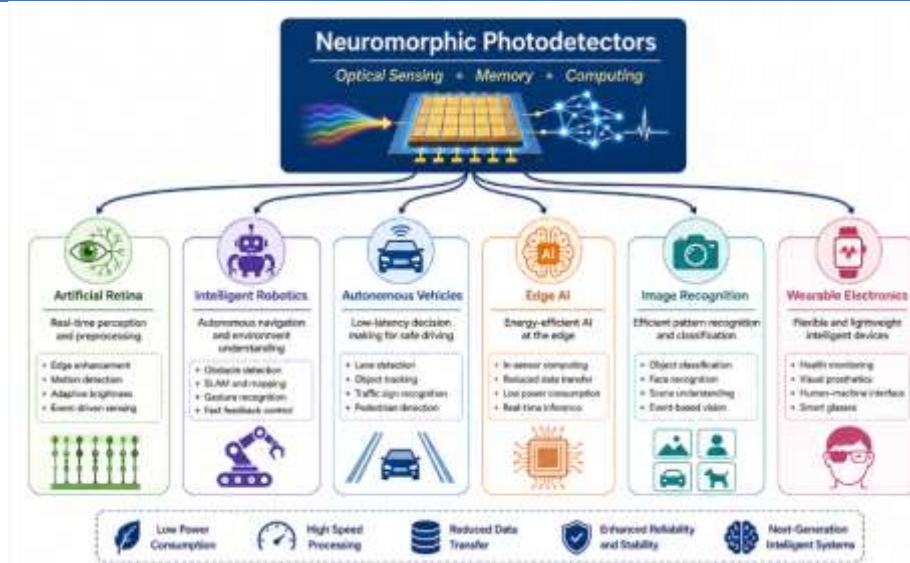


Figure 5. Artificial vision applications (robotics, autonomous vehicles, edge AI) (Created by the author).

3.5 Current Challenges

Despite the remarkable progress achieved in recent years, several challenges continue to limit the widespread implementation of neuromorphic photodetectors in practical artificial vision systems. One of the primary concerns is **device stability**. Many high-performance material platforms, particularly halide perovskites and certain two-dimensional semiconductors, are highly sensitive to environmental factors such as moisture, oxygen, and elevated temperatures. These degradation mechanisms can significantly reduce device lifetime and reliability, limiting their practical deployment outside laboratory conditions (Chen et al., 2023).

Another major challenge is the **scalability of device fabrication**. Although numerous studies have demonstrated excellent synaptic performance at the laboratory scale, producing large-area, highly uniform neuromorphic photodetector arrays remains difficult. Variations in material quality, interface defects, and fabrication inconsistencies often result in device-to-device performance fluctuations, which negatively affect the accuracy of artificial vision systems (Wan et al., 2022).

The integration of neuromorphic photodetectors with existing **CMOS technology** also remains an important issue. Since modern electronic systems are primarily based on CMOS fabrication processes, developing neuromorphic devices that are fully compatible with current semiconductor manufacturing technologies is essential for large-scale commercialization. Achieving low operating voltage, high integration density, and reliable long-term operation while maintaining CMOS compatibility is therefore an active area of research (Xu & Jin, 2023).

Another critical challenge involves simultaneously optimizing multiple device characteristics. High photoresponsivity, ultrafast response speed, low power consumption, long memory retention, and stable synaptic plasticity are often difficult to achieve within a single material system. Consequently, future studies are expected to focus on designing hybrid material platforms and heterostructure devices that combine the advantages of different semiconductor materials while minimizing their individual limitations (Wang et al., 2024).

Despite these challenges, the future outlook for neuromorphic photodetectors remains highly promising. Continuous advances in nanomaterials, device engineering, and artificial intelligence algorithms are expected to accelerate the development of highly efficient in-sensor computing systems. Future research will likely focus on environmentally stable materials, wafer-scale fabrication techniques, improved CMOS integration, and multifunctional device architectures capable of supporting real-time artificial vision with extremely low energy consumption. These developments are anticipated to play a key role in next-generation intelligent robotics, autonomous transportation, wearable electronics, and edge AI platforms.

4. Conclusion and Recommendations

Neuromorphic photodetectors have emerged as one of the most promising technologies for next-generation intelligent vision systems by integrating optical sensing, memory storage, and information processing within a single device. Unlike conventional photodetectors that rely on the von Neumann computing architecture, neuromorphic devices perform preliminary data processing directly at the sensing stage, significantly reducing data transfer, computational latency, and energy consumption. This unique capability provides an effective solution to the increasing computational demands of artificial intelligence and edge computing applications.

This review has summarized the fundamental operating principles of neuromorphic photodetectors, emphasizing the importance of optoelectronic synaptic behaviors such as excitatory postsynaptic current (EPSC), paired-pulse facilitation (PPF), short-term plasticity (STP), and long-term plasticity (LTP). These characteristics enable neuromorphic devices to emulate biological learning and memory processes, providing a hardware platform capable of intelligent visual perception and adaptive information processing.

Recent developments in material science have played a critical role in improving the performance of neuromorphic photodetectors. Two-dimensional materials, perovskites, metal oxides, quantum dots, organic semiconductors, and ferroelectric materials each offer unique advantages for neuromorphic vision applications. While two-dimensional materials exhibit excellent carrier transport and fast photoresponse, perovskites provide outstanding optical absorption, and metal oxides offer superior environmental stability and CMOS compatibility. The continuous development of hybrid material systems is expected to further improve device performance and reliability.

The rapid evolution of in-sensor computing has also expanded the application potential of neuromorphic photodetectors in artificial retina systems, intelligent robotics, autonomous vehicles, wearable electronics, image recognition, and edge AI platforms. By integrating sensing and computation into a unified hardware architecture, these devices enable real-time decision-making while minimizing computational complexity and power consumption.

Despite these remarkable achievements, several technical challenges remain before widespread commercialization can be achieved. Long-term operational stability, scalable fabrication, device uniformity, and compatibility with existing semiconductor manufacturing technologies continue to require further investigation. Future research should focus on developing environmentally stable materials, scalable fabrication techniques, multifunctional heterostructures, and highly integrated neuromorphic vision systems that combine superior photoresponse with reliable synaptic performance.

In conclusion, neuromorphic photodetectors represent an important step toward bio-inspired intelligent electronics. Their ability to simultaneously sense, memorize, and process optical information offers significant advantages over conventional imaging technologies. With continued advances in material engineering, device design, and artificial intelligence integration, neuromorphic photodetectors are expected to become key components of future low-power, high-speed, and intelligent optoelectronic systems.

Thanks and Information Note

The author would like to thank all researchers whose valuable contributions have significantly advanced the field of neuromorphic photodetectors and artificial vision systems. No external funding was received specifically for the preparation of this review paper.

References

- Ayyad, A., Halwani, M., Swart, D., Muthusamy, R., Almaskari, F. & Zweiri, Y. (2022). Neuromorphic vision based control for the precise positioning of robotic drilling systems. *arXiv*.
- Chen, X., Zhang, Y., Liu, H. & Wang, Z. (2023). Emerging photoelectric devices for neuromorphic vision applications: Principles, developments, and outlooks. *Science and Technology of Advanced Materials*, **24**(1), Article 2186689.
- Cho, S. W., Jo, C., Kim, Y. H. & Park, S. K. (2022). Progress of materials and devices for neuromorphic vision sensors. *Nano-Micro Letters*, **14**, Article 203.

- Christensen, D. V., Dittmann, R., Linares-Barranco, B., Sebastian, A. et al. (2022). 2022 roadmap on neuromorphic computing and engineering. *Neuromorphic Computing and Engineering*, **2**(2), 022501.
- Guo, Y., Li, X., Zhang, H. & Chen, L. (2023). Optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing: Recent advances and future perspectives. *Advanced Functional Materials*, **33**.
- Hasan, M. S., Schuman, C. D., Zhang, Z., Rahman, T. & Rose, G. S. (2023). Spike-based neuromorphic computing for next-generation computer vision. *arXiv*.
- Hoffmann, A., Ramanathan, S., Grollier, J. et al. (2022). Quantum materials for energy-efficient neuromorphic computing. *arXiv*.
- Li, R., Gong, Y., Huang, H., Zhou, Y., Mao, S., Wei, Z. & Zhang, Z. (2023). Photonics for neuromorphic computing: Fundamentals, devices, and opportunities. *arXiv*.
- Roy, K., Jaiswal, A. & Panda, P. (2019). Towards spike-based machine intelligence with neuromorphic computing. *Nature*, **575**, 607–617.
- Wan, C., Li, H., Zhang, X. & Chen, P. (2022). Recent advances in neuromorphic vision sensors for artificial intelligence applications. *Nano-Micro Letters*, **14**.
- Wang, Y., Zhao, H., Liu, X. & Chen, Y. (2024). Recent advances in optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing. *Micromachines*, **15**.
- Xu, X. & Jin, Y. (2023). Integrated photonic computing beyond the von Neumann architecture. *ACS Photonics*, **10**, 2556–2572.
- Zhang, L., Sun, Y., Li, M. & Wang, J. (2025). Devices, functions, and applications of artificial neuromorphic visual systems. *Advanced Science*, **12**.
- Zhang, Y., Huang, Z. & Jiang, J. (2023). Emerging photoelectric devices for neuromorphic vision applications: Principles, developments, and outlooks. *Science and Technology of Advanced Materials*, **24**(1), Article 2186689.
- Zhao, H., Liu, S., Wang, T. & Chen, X. (2023). Metal oxide semiconductors for neuromorphic optoelectronic devices. *Advanced Materials*, **35**.
- Zou, Z., Wang, Y., Xu, Q. & Liu, M. (2021). Breaking the von Neumann bottleneck: Architecture-level processing-in-memory technology. *Science China Information Sciences*, **64**, 160404.

MoS₂-BASED NEUROMORPHIC PHOTODETECTORS: MECHANISMS AND APPLICATIONS

İpek BALNAN

Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences,
Department of Engineering Basic Sciences, Sivas-Türkiye

Email: balnanipek@sivas.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1150-651X>

Abstract

Molybdenum disulfide (MoS₂), one of the most extensively studied two-dimensional transition metal dichalcogenides, has emerged as a promising material for next-generation optoelectronic devices owing to its tunable bandgap, high carrier mobility, strong light–matter interaction, and atomically thin structure. However, the intrinsic limitations of pristine MoS₂-based devices have driven extensive research toward heterostructure engineering to achieve enhanced device performance. MoS₂ heterostructures offer significant advantages, including improved charge carrier separation, enhanced light absorption, and superior operational stability. This review provides a comprehensive overview of the fundamental principles, synthesis strategies, and structural characteristics of MoS₂-based heterostructures. Particular attention is devoted to heterostructures formed between MoS₂ and graphene, other two-dimensional materials, metal oxides, perovskites, and organic semiconductors, highlighting their recent advances in photodetectors, solar cells, light-emitting diodes, field-effect transistors, and flexible electronic devices. Furthermore, current challenges related to scalable fabrication, interface engineering, device stability, and commercial integration are critically discussed, and future perspectives for the development of high-performance optoelectronic systems are presented.

Keywords: MoS₂ Heterostructures, Two-Dimensional Materials, Optoelectronic Devices, Van der Waals Heterostructures

1. Introduction

The rapid advancement of artificial intelligence (AI), machine vision, and edge computing has accelerated the demand for intelligent optoelectronic devices capable of simultaneously sensing, storing, and processing visual information. Conventional photodetection systems are generally based on the von Neumann computing architecture, where image sensing, memory, and computation are physically separated. Although this architecture has supported modern digital technologies for decades, the continuous transfer of large volumes of visual data between these individual units results in high latency, excessive power consumption, and limited computational efficiency. These limitations have motivated researchers to develop neuromorphic hardware capable of emulating the highly efficient information-processing strategy of the human visual system (Roy et al., 2019; Christensen et al., 2022).

Neuromorphic photodetectors have emerged as promising candidates for next-generation artificial vision systems because they integrate optical sensing, memory, and information processing within a single device. Inspired by biological synapses, these devices exhibit learning and memory functions through light-induced conductance modulation, enabling in-sensor computing with significantly reduced energy consumption. Such capabilities are particularly attractive for edge artificial intelligence, autonomous robotics, wearable electronics, and intelligent image recognition systems (Wan et al., 2022; Wang et al., 2024).

Among various two-dimensional semiconductors, molybdenum disulfide (MoS_2) has attracted considerable attention due to its exceptional electrical and optical properties. Unlike graphene, which possesses a zero bandgap, MoS_2 exhibits a thickness-dependent bandgap, changing from an indirect bandgap of approximately 1.2 eV in bulk form to a direct bandgap of about 1.8 eV in the monolayer structure. This transition significantly enhances light absorption and photoluminescence efficiency, making MoS_2 an excellent material for high-performance photodetection. In addition, its atomically thin structure, strong light-matter interaction, mechanical flexibility, and compatibility with van der Waals heterostructures make it highly suitable for neuromorphic optoelectronic devices (Mak & Shan, 2016; Chhowalla et al., 2016).

As illustrated, the crystal structure of MoS_2 consists of a hexagonal layer in which a molybdenum (Mo) atomic plane is sandwiched between two sulfur (S) atomic planes (**Figure 1**). The weak van der Waals interaction between adjacent layers enables mechanical exfoliation and the fabrication of high-quality heterostructures with other two-dimensional materials. These unique structural characteristics provide efficient carrier transport, strong optical absorption, and tunable electronic properties, which are essential for realizing high-performance neuromorphic photodetectors.

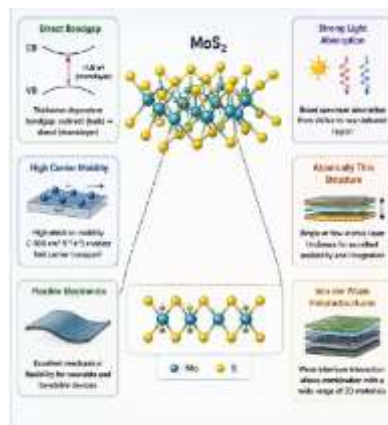


Figure 1. Crystal structure and key physical properties of MoS_2 for neuromorphic photodetection (Created by the author).

Despite these remarkable advantages, pristine MoS_2 -based photodetectors still suffer from several limitations, including relatively slow response speed, charge recombination, interface defects, and limited optical absorption in certain wavelength regions. To overcome these challenges, extensive research has focused on device engineering through heterostructure design, interface optimization, defect engineering, and hybrid material integration. These approaches significantly improve charge

carrier separation, enhance photoresponsivity, and promote stable synaptic characteristics required for neuromorphic computing applications (Chen et al., 2023).

This review summarizes the recent progress in MoS₂-based neuromorphic photodetectors, focusing on their structural properties, operating mechanisms, heterostructure engineering, and emerging applications. Furthermore, current challenges and future research directions are discussed to provide a comprehensive perspective on the development of high-performance MoS₂-based neuromorphic optoelectronic systems.

2. Materials and Methods

This study was conducted as a comprehensive literature review focusing on recent advances in MoS₂-based neuromorphic photodetectors. Relevant publications were collected from major scientific databases, including Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar. The literature search primarily covered publications published between 2020 and 2025, while several earlier landmark studies were included to establish the fundamental understanding of MoS₂ and neuromorphic optoelectronics.

The search strategy employed combinations of keywords such as *MoS₂*, *neuromorphic photodetectors*, *optoelectronic synapse*, *two-dimensional materials*, *artificial vision*, *in-sensor computing*, *transition metal dichalcogenides*, and *van der Waals heterostructures*. The collected studies were evaluated according to their relevance to material properties, device architecture, operating mechanisms, heterostructure engineering, and neuromorphic applications.

After the screening process, recent research articles and review papers published in high-impact journals were selected for detailed evaluation. The selected literature was comparatively analyzed in terms of crystal structure, electronic properties, fabrication techniques, synaptic characteristics, device performance, and application potential. The findings were subsequently categorized into structural properties, operating mechanisms, heterostructure engineering, application areas, and future challenges to provide a systematic overview of current developments in MoS₂-based neuromorphic photodetectors.

3. Findings and Discussion

3.1 Structural and Electronic Properties of MoS₂

Molybdenum disulfide (MoS₂) is one of the most extensively investigated transition metal dichalcogenides (TMDs) owing to its unique electrical, optical, and mechanical properties. Unlike graphene, which possesses a zero bandgap, MoS₂ exhibits a thickness-dependent band structure. Bulk MoS₂ behaves as an indirect bandgap semiconductor with a bandgap of approximately 1.2 eV, whereas monolayer MoS₂ exhibits a direct bandgap of nearly 1.8 eV. This indirect-to-direct bandgap transition significantly enhances light absorption and photoluminescence efficiency, making monolayer MoS₂ highly attractive for optoelectronic and neuromorphic photodetection applications (Mak & Shan, 2016).

The crystal structure of MoS₂ consists of a hexagonal lattice in which one layer of molybdenum atoms is sandwiched between two sulfur atomic layers. Adjacent layers are connected through weak van der Waals interactions, allowing high-quality exfoliation and the fabrication of various heterostructures without lattice mismatch. As illustrated, these structural characteristics provide exceptional flexibility for combining MoS₂ with graphene, other two-dimensional materials, metal oxides, perovskites, and organic semiconductors (Figure 2).

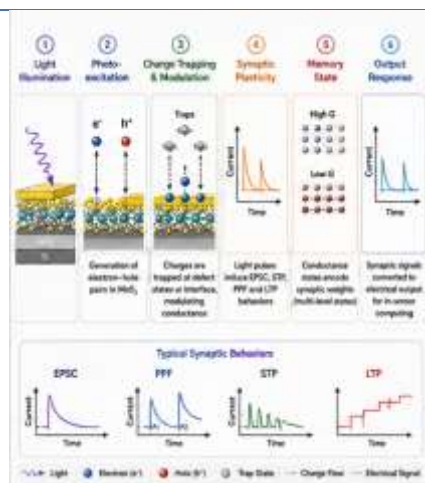


Figure 2. Operating mechanism of a MoS₂-based neuromorphic photodetector (*Created by the author*).

MoS₂ also exhibits strong light–matter interaction despite its atomically thin thickness. The high optical absorption coefficient enables efficient photon harvesting, while relatively high carrier mobility supports rapid charge transport. Furthermore, the large surface-to-volume ratio facilitates charge trapping and interface engineering, which are essential for achieving persistent photoconductivity and synaptic memory effects in neuromorphic devices.

Another important advantage of MoS₂ is its compatibility with van der Waals heterostructure engineering. Since neighboring layers are bonded through weak van der Waals forces rather than covalent interactions, different materials can be vertically stacked without strict lattice matching requirements. This feature enables researchers to design multifunctional heterostructures with enhanced carrier separation, reduced recombination, and improved photoresponse compared with pristine MoS₂ devices.

These outstanding structural and electronic properties have established MoS₂ as one of the most promising semiconductor materials for neuromorphic photodetectors. However, the practical implementation of pristine MoS₂ devices remains limited by relatively slow response speed, trap-assisted recombination, and limited spectral response. Consequently, extensive research has focused on heterostructure engineering and interface optimization, which are discussed in the following sections.

3.2. Operating Mechanisms of MoS₂-Based Neuromorphic Photodetectors

MoS₂-based neuromorphic photodetectors operate by integrating optical sensing, memory, and signal processing within a single device, thereby mimicking the behavior of biological visual synapses. Unlike conventional photodetectors, which simply convert incident light into electrical signals, neuromorphic photodetectors are capable of retaining photo-induced information through persistent conductance modulation. This unique functionality enables the implementation of in-sensor computing, where sensing and computation occur simultaneously without continuous data transfer to external memory or processors (Roy et al., 2019; Wan et al., 2022).

The operation of these devices begins with photon absorption by the MoS₂ active layer. Because monolayer MoS₂ possesses a direct bandgap of approximately 1.8 eV, it exhibits strong absorption in the visible region and efficiently generates electron–hole pairs under optical illumination. The generated charge carriers are transported through the semiconductor channel, producing a photocurrent proportional to the incident light intensity. Compared with graphene, the presence of a finite bandgap allows MoS₂ to achieve a higher on/off current ratio and lower dark current, making it particularly suitable for photodetection applications (Mak & Shan, 2016; Chhowalla et al., 2016).

Photogenerated carriers subsequently undergo charge modulation through several physical mechanisms, including charge trapping, defect-assisted carrier localization, interface charge transfer, ion migration, and ferroelectric polarization depending on the device configuration. These processes regulate the channel conductance and enable the storage of optical information even after the light source is removed. Consequently, the device exhibits memory characteristics that resemble biological synapses and form the basis of neuromorphic information processing (Chen et al., 2023; Wang et al., 2024).

One of the most important neuromorphic characteristics is the **excitatory postsynaptic current (EPSC)**. During optical stimulation, the photocurrent rapidly increases because of electron–hole pair generation. After the optical pulse ends, the current gradually decays as trapped carriers are released and recombine. The relaxation profile of the EPSC provides valuable information regarding the optical memory capability of the device. A slower decay generally indicates stronger carrier trapping and improved memory retention, which are desirable characteristics for artificial visual perception systems (Guo et al., 2023; Wang et al., 2024).

MoS₂-based devices also exhibit **paired-pulse facilitation (PPF)**, in which two successive optical pulses separated by a short time interval generate an enhanced second response. This phenomenon occurs because a fraction of the photogenerated carriers remains trapped after the first pulse and contributes to the photocurrent generated by the second pulse. PPF is considered an important indicator of short-term information retention and temporal signal processing, closely resembling the behavior of biological synapses (Wan et al., 2022; Guo et al., 2023).

Another important feature is the transition from **short-term plasticity (STP)** to **long-term plasticity (LTP)**. Under weak or infrequent optical stimulation, the conductance gradually returns to its initial state, corresponding to STP. However, repeated or high-intensity optical pulses generate a larger number of trapped carriers, resulting in stable conductance states that persist for extended periods. This transition enables artificial learning and long-term memory formation, making MoS₂-based neuromorphic photodetectors suitable for pattern recognition, image memorization, and adaptive visual computing (Roy et al., 2019; Chen et al., 2023).

Recent studies have demonstrated that the neuromorphic performance of MoS₂ can be further enhanced through interface engineering and heterostructure design. By introducing additional charge trapping centers or optimizing interfacial band alignment, researchers have achieved improved photoresponsivity, faster response speed, longer memory retention, and lower operating voltages. These improvements significantly enhance the capability of MoS₂-based devices to perform real-time visual perception and in-sensor computing while maintaining low energy consumption, making them promising candidates for next-generation artificial vision hardware (Xu & Jin, 2023; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2025).

3.3 MoS₂ Heterostructures for Neuromorphic Photodetectors

Although pristine MoS₂ possesses excellent optoelectronic properties, its practical performance in neuromorphic photodetectors is still constrained by limited optical absorption, charge recombination, and relatively slow response dynamics. To address these challenges, heterostructure engineering has become one of the most effective strategies for improving device performance. By combining MoS₂ with complementary semiconductor materials through van der Waals interactions, heterostructures can enhance carrier separation, suppress recombination losses, and improve synaptic characteristics without introducing significant lattice mismatch (Geim & Grigorieva, 2013; Chhowalla et al., 2016).

Among the various heterostructures reported in the literature, **graphene/MoS₂ heterostructures** have attracted the greatest attention. Graphene provides extremely high carrier mobility and excellent electrical conductivity, while MoS₂ serves as an efficient light-absorbing semiconductor with a suitable bandgap for visible-light photodetection. Following optical excitation, photogenerated electrons are efficiently transferred across the graphene/MoS₂ interface, reducing electron–hole recombination and accelerating charge transport. Consequently, these devices exhibit higher photoresponsivity, faster response times, and improved neuromorphic performance compared with pristine MoS₂ photodetectors (Novoselov et al., 2016; Mak & Shan, 2016).

Another important class consists of **transition metal dichalcogenide (TMD) heterostructures**, including WS₂/MoS₂ and WSe₂/MoS₂. These vertically stacked structures generally exhibit type-II band alignment, which spatially separates electrons and holes into different semiconductor layers after photoexcitation. Such efficient charge separation prolongs carrier lifetime, enhances optical memory, and improves synaptic behaviors such as excitatory postsynaptic current (EPSC) and long-term plasticity (LTP). These characteristics are particularly advantageous for artificial vision systems that require persistent optical memory and low-power information processing (Jariwala et al., 2017; Wang et al., 2024).

Metal oxide/MoS₂ heterostructures have also demonstrated significant potential for neuromorphic photodetection. Semiconductor oxides such as ZnO, TiO₂, and indium gallium zinc oxide (IGZO)

introduce built-in electric fields at the heterointerface, facilitating rapid charge separation while suppressing dark current. Furthermore, these materials exhibit excellent environmental stability and compatibility with complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS) fabrication technologies, making them attractive for large-scale integrated neuromorphic vision systems. The combination of high detectivity and stable conductance modulation has enabled metal oxide/MoS₂ devices to achieve reliable synaptic responses under repeated optical stimulation (Chen et al., 2023; Zhao et al., 2023).

In recent years, **perovskite/MoS₂ heterostructures** have emerged as promising candidates for high-performance neuromorphic photodetectors. Halide perovskites possess outstanding optical absorption coefficients, long carrier diffusion lengths, and excellent wavelength tunability, whereas MoS₂ provides efficient carrier transport and mechanical flexibility. Their integration significantly enhances interfacial charge transfer, resulting in stronger photoresponse, longer carrier lifetime, and improved memory retention. Consequently, perovskite/MoS₂ heterostructures have demonstrated excellent performance in artificial retina systems and in-sensor computing applications operating under low power conditions (Snaith, 2018; Wang et al., 2024).

Flexible neuromorphic electronics have also benefited from **organic semiconductor/MoS₂ heterostructures**. Organic semiconductors offer lightweight structures, mechanical flexibility, and solution-processable fabrication, whereas MoS₂ contributes superior electrical transport characteristics. The complementary properties of these materials enable the fabrication of flexible neuromorphic photodetectors suitable for wearable healthcare devices, electronic skin, and portable intelligent sensing systems. Although further improvements in long-term stability are still required, recent studies have demonstrated continuous progress in enhancing both electrical performance and mechanical durability (Guo et al., 2023).

The major categories of MoS₂-based heterostructures employed in neuromorphic photodetectors are illustrated (Figure 3), while their representative advantages and application areas are summarized (Table 1). As shown, each heterostructure offers unique benefits depending on the target application. Graphene primarily improves carrier transport, transition metal dichalcogenides enhance interfacial charge separation, metal oxides increase operational stability, perovskites provide superior optical absorption, and organic semiconductors enable mechanical flexibility. Therefore, heterostructure engineering has become one of the most effective approaches for optimizing the overall performance of MoS₂-based neuromorphic photodetectors and expanding their application in next-generation artificial vision systems (Wan et al., 2022; Zhang et al., 2025).

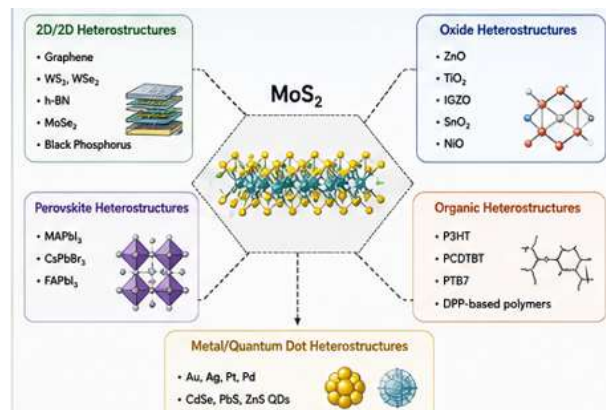


Figure 3. Classification of representative MoS₂-based heterostructures for neuromorphic photodetectors (Created by the author).

Table 1. Representative MoS₂-based heterostructures and their advantages in neuromorphic photodetectors.

Heterostructure	Main Advantage	Application
Graphene/MoS ₂	High carrier mobility	Artificial vision
WS ₂ /MoS ₂	Efficient charge separation	Image sensing
WSe ₂ /MoS ₂	Long carrier lifetime	Optical memory
ZnO/MoS ₂	High photoresponsivity	UV photodetection
IGZO/MoS ₂	Low dark current	In-sensor computing
Perovskite/MoS ₂	Strong light absorption	Artificial retina
Organic/MoS ₂	Mechanical flexibility	Wearable electronics

3.4 Applications of MoS₂-Based Neuromorphic Photodetectors

The outstanding electrical and optoelectronic properties of MoS₂ have enabled its application in a wide range of neuromorphic vision systems. By integrating optical sensing, memory, and information processing within a single device, MoS₂-based neuromorphic photodetectors offer an efficient hardware platform for low-power artificial intelligence and edge computing applications. Their capability to emulate biological synaptic functions while maintaining high photoresponsivity makes them attractive for next-generation intelligent optoelectronic systems (Roy et al., 2019; Wan et al., 2022).

One of the most important application areas is **artificial vision**. Inspired by the human retina, MoS₂-based neuromorphic photodetectors can preprocess optical information before transmission to higher computational units. Functions such as edge detection, contrast enhancement, motion perception, and adaptive visual learning can be achieved directly within the sensing hardware, significantly reducing computational complexity and data transfer requirements. These characteristics make MoS₂ devices promising candidates for artificial retina systems and bio-inspired image sensors (Chen et al., 2023; Zhang et al., 2025).

Another rapidly expanding application is **edge artificial intelligence (Edge AI)**. Conventional AI systems require continuous communication between sensors, memory, and processors, resulting in high energy consumption and processing delays. In contrast, MoS₂-based neuromorphic photodetectors perform preliminary feature extraction directly during image acquisition through in-sensor computing. This capability enables real-time data processing while minimizing latency and energy consumption, making these devices particularly suitable for portable intelligent electronics and distributed sensing networks (Xu & Jin, 2023; Wang et al., 2024).

MoS₂-based neuromorphic photodetectors have also demonstrated significant potential in **autonomous robotics and intelligent image recognition**. Robots operating in dynamic environments require continuous visual feedback for navigation, object detection, and obstacle avoidance. By integrating sensing and memory into a single platform, MoS₂ devices enable rapid visual perception with lower computational overhead than conventional imaging systems. Their synaptic characteristics further support adaptive learning and pattern recognition, improving the efficiency of autonomous decision-making (Roy et al., 2019; Guo et al., 2023).

In addition, the excellent mechanical flexibility of atomically thin MoS₂ makes it highly attractive for **wearable electronics and flexible optoelectronic devices**. Flexible neuromorphic photodetectors fabricated on polymer substrates can maintain stable electrical performance under repeated bending and mechanical deformation. Such devices are expected to play an important role in wearable healthcare systems, electronic skin, human-machine interfaces, and portable biomedical monitoring technologies, where lightweight and energy-efficient operation are essential (Chhowalla et al., 2016; Guo et al., 2023).

The major application areas of MoS₂-based neuromorphic photodetectors are summarized (Figure 4). As shown, artificial vision, image recognition, edge AI, autonomous robotics, and wearable electronics represent the primary research directions driving the development of MoS₂-based neuromorphic optoelectronic devices. Continuous advances in heterostructure engineering, interface optimization, and large-area fabrication are expected to further expand these applications in future intelligent electronic systems (Wan et al., 2022; Zhang et al., 2025).



Figure 4. Major applications of MoS₂-based neuromorphic photodetectors in artificial vision and intelligent optoelectronic systems (*Created by the author*).

3.5 Challenges and Future Perspectives

Despite the remarkable progress achieved in recent years, several challenges continue to hinder the large-scale implementation of MoS₂-based neuromorphic photodetectors. One of the most significant issues is the scalable synthesis of high-quality MoS₂ films. Although mechanical exfoliation provides excellent crystal quality for laboratory-scale studies, it is not suitable for mass production. Chemical vapor deposition (CVD) has emerged as one of the most promising techniques for wafer-scale fabrication; however, controlling layer uniformity, crystal orientation, grain boundaries, and defect density remains challenging. These structural imperfections can significantly influence carrier transport, photoresponse, and synaptic performance (Chhowalla et al., 2016; Jariwala et al., 2017).

Another important challenge is interface engineering in MoS₂-based heterostructures. Since the neuromorphic behavior of these devices strongly depends on interfacial charge transfer and carrier trapping, defects, impurities, and poor interfacial contact can reduce photoresponsivity and memory retention. Therefore, optimizing heterojunction quality and understanding interfacial physical mechanisms are essential for improving device reliability and long-term operational stability (Geim & Grigorieva, 2013; Chen et al., 2023).

Long-term environmental stability also remains a critical concern. Continuous optical illumination, moisture, oxygen exposure, and thermal fluctuations may gradually degrade device performance, particularly in hybrid heterostructures containing perovskites or organic semiconductors. Future research should therefore focus on effective encapsulation strategies, defect passivation, and stable material combinations capable of maintaining consistent performance under practical operating conditions (Wang et al., 2024).

Furthermore, integrating MoS₂-based neuromorphic photodetectors with complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS) technology is necessary for their commercialization. Achieving low operating voltage, high device uniformity, and compatibility with existing semiconductor fabrication processes will facilitate the development of large-scale neuromorphic imaging arrays and intelligent sensing platforms. Improvements in fabrication techniques and device integration are expected to accelerate the transition of these technologies from laboratory research to commercial applications (Xu & Jin, 2023; Zhang et al., 2025).

The future prospects of MoS₂-based neuromorphic photodetectors are summarized. (Figure 5) Continued advances in large-area MoS₂ growth, heterostructure engineering, interface optimization, and CMOS integration are expected to significantly enhance device performance. Combined with recent developments in artificial intelligence and edge computing, these improvements will contribute to the realization of highly efficient artificial vision systems capable of real-time sensing, learning, and information processing with minimal energy consumption.



Figure 5. Future research roadmap for MoS₂-based neuromorphic photodetectors, highlighting scalable fabrication, heterostructure engineering, interface optimization, CMOS integration, and intelligent artificial vision systems (*Created by the author*).

4. Conclusion and Recommendations

MoS₂ has become one of the most promising semiconductor materials for neuromorphic photodetectors due to its tunable bandgap, strong light–matter interaction, atomically thin structure, and excellent compatibility with van der Waals heterostructures. These unique properties enable MoS₂-based devices to integrate optical sensing, memory storage, and information processing within a single platform, providing an efficient hardware solution for artificial vision and edge artificial intelligence systems.

This review has discussed the structural and electronic properties of MoS₂, its operating mechanisms in neuromorphic photodetectors, and the recent progress in heterostructure engineering. The integration of MoS₂ with graphene, transition metal dichalcogenides, metal oxides, perovskites, and organic semiconductors has significantly improved carrier separation, photoresponsivity, optical memory, and synaptic characteristics, demonstrating the importance of heterostructure design for achieving high-performance neuromorphic devices (Mak & Shan, 2016; Wang et al., 2024).

Recent studies have further demonstrated that MoS₂-based neuromorphic photodetectors can successfully emulate biological synaptic functions, including excitatory postsynaptic current (EPSC), paired-pulse facilitation (PPF), short-term plasticity (STP), and long-term plasticity (LTP). These capabilities allow optical information to be sensed, stored, and processed simultaneously, making MoS₂ an attractive material for next-generation neuromorphic vision systems. Consequently, the application of these devices has expanded from laboratory demonstrations to promising technologies for artificial vision, intelligent image recognition, autonomous robotics, wearable electronics, and edge AI platforms (Roy et al., 2019; Wan et al., 2022).

Despite these remarkable achievements, several scientific and technological challenges remain. Large-area synthesis of defect-controlled MoS₂ films, interface engineering, long-term environmental stability, and compatibility with CMOS manufacturing processes continue to limit commercial implementation. Future research should therefore focus on scalable fabrication methods, advanced heterostructure engineering, defect passivation, and highly integrated neuromorphic architectures capable of achieving low power consumption, fast response speed, and reliable long-term operation (Chen et al., 2023; Xu & Jin, 2023).

In conclusion, MoS₂-based neuromorphic photodetectors represent a promising platform for the development of next-generation intelligent optoelectronic systems. Their outstanding physical properties, together with continuous advances in material engineering and device architecture, are expected to accelerate the realization of high-performance artificial vision technologies capable of efficient sensing, learning, and information processing. Continued interdisciplinary research combining materials science, nanotechnology, and artificial intelligence will further expand the practical applications of MoS₂-based neuromorphic photodetectors in future smart electronic systems (Zhang et al., 2025).

Thanks and Information Note

The author would like to thank all researchers whose valuable contributions have significantly advanced the field of neuromorphic photodetectors and artificial vision systems. No external funding was received specifically for the preparation of this review paper.

References

- Butler, S. Z., Hollen, S. M., Cao, L., Cui, Y., Gupta, J. A., Gutiérrez, H. R., Heinz, T. F., Hong, S. S., Huang, J., Ismach, A. F., Johnston-Halperin, E., Kuno, M., Plashnitsa, V. V., Robinson, R. D., Ruoff, R. S., Salahuddin, S., Shan, J., Shi, L., Spencer, M. G., Terrones, M., Windl, W. & Goldberger, J. E. (2013). Progress, challenges, and opportunities in two-dimensional materials beyond graphene. *ACS Nano*, 7(4), 2898–2926.
- Chen, X., Zhang, Y., Liu, H. & Wang, Z. (2023). Emerging photoelectric devices for neuromorphic vision applications: Principles, developments, and outlooks. *Science and Technology of Advanced Materials*, 24(1).
- Chhowalla, M., Shin, H. S., Eda, G., Li, L. J., Loh, K. P. & Zhang, H. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature Chemistry*, 5(4), 263–275.
- Christensen, D. V., Dittmann, R., Linares-Barranco, B., Sebastian, A. et al. (2022). 2022 roadmap on neuromorphic computing and engineering. *Neuromorphic Computing and Engineering*, 2(2), 022501.
- Geim, A. K. & Grigorieva, I. V. (2013). Van der Waals heterostructures. *Nature*, 499, 419–425.
- Guo, Y., Li, X., Zhang, H. & Chen, L. (2023). Recent advances in optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing. *Advanced Functional Materials*, 33.
- Jariwala, D., Sangwan, V. K., Lauhon, L. J., Marks, T. J. & Hersam, M. C. (2014). Emerging device applications for semiconducting two-dimensional transition metal dichalcogenides. *ACS Nano*, 8(2), 1102–1120.
- Mak, K. F. & Shan, J. (2016). Photonics and optoelectronics of two-dimensional semiconductor transition metal dichalcogenides. *Nature Photonics*, 10, 216–226.
- Novoselov, K. S., Mishchenko, A., Carvalho, A. & Castro Neto, A. H. (2016). 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*, 353(6298).
- Roy, K., Jaiswal, A. & Panda, P. (2019). Towards spike-based machine intelligence with neuromorphic computing. *Nature*, 575, 607–617.
- Wan, C., Li, H., Zhang, X. & Chen, P. (2022). Progress of materials and devices for neuromorphic vision sensors. *Nano-Micro Letters*, 14.
- Wang, Y., Zhao, H., Liu, X. & Chen, Y. (2024). Recent advances in optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing. *Micromachines*, 15.
- Xu, X. & Jin, Y. (2023). Integrated photonic computing beyond the von Neumann architecture. *ACS Photonics*, 10, 2556–2572.
- Zhang, L., Sun, Y., Li, M. & Wang, J. (2025). Devices, functions, and applications of artificial neuromorphic visual systems. *Advanced Science*, 12.
- Zhao, H., Liu, S., Wang, T. & Chen, X. (2023). Metal oxide semiconductors for neuromorphic optoelectronic devices. *Advanced Materials*, 35.

**KIYI ALANLARINDA BAĞLANTILILIK VE KAMUSAL MEKÂN ENTEGRASYONU İÇİN
BİR PEYZAJ TASARIM ÖNERİSİ: TIRILYE ÖRNEĞİ**

Ayşenur DEMİR

Uludağ University, Institute of Science, Department of Landscape Architecture, Bursa-Türkiye

Email: 502530004@ogr.uludag.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-0589-1100>

Prof. Dr. Elvan ENDER ALTAY

Uludağ University, Faculty of Agriculture, Department of Landscape Architecture, Bursa-Türkiye

Email: elvanender@uludag.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5933-1611>

Özet

Kıyı peyzajlarında ekolojik bağlantılılık ile kamusal mekân kullanımının birlikte ele alınması, kıyı alanlarının sürdürülebilir tasarımı açısından bütüncül ve çok katmanlı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma, Tirilye kıyı bandı örneği üzerinden mekânsal organizasyon ile kamusal kullanım arasındaki ilişkiyi ekolojik ve kentsel bağlamda değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Kıyı alanları, kara ve deniz ekosistemlerinin kesişiminde yer alan; ekolojik, mekânsal, kültürel ve sosyal açıdan değerli geçiş zonlarıdır. Bu alanlar, farklı kullanım türlerini barındıran, kamusal yaşamın sürekliliğini destekleyen ve kent-kıyı ilişkisini şekillendiren eşik mekânlardır. Bu bağlamda araştırma; kıyı kavramı, ekolojik bağlantılılık, mekânsal süreklilik, çok katmanlı mekânsal etkileşim ve kamusal mekân niteliği çerçevesinde ele alınmıştır. Çalışma alanı, Bursa Mudanya'daki Tirilye (Zeytinbağı) yerleşiminin Marmara Denizi kıyısında yer alan 46.451 m² büyüklüğündeki kıyı bandıdır. Araştırma kapsamında alanın iklimsel özellikleri, rüzgâr rejimi, topoğrafik yapısı, demografik durumu, flora ve fauna bileşimi, kullanım deseni, ulaşım bağlantıları, koruma statüsü ve gürültü düzeyi analiz edilmiştir. Veriler, alanın mekânsal potansiyelini ve kısıtlarını ortaya koyacak biçimde değerlendirilmiştir. Tirilye'nin tarihî ve kültürel kimliği, kıyı-kent ilişkisi ve doğal peyzaj karakteri, tasarım sürecinin temel belirleyicileri olarak ele alınmıştır. Koruma-kullanma dengesi gözetilerek kıyı ekosisteminin sürekliliğini destekleyen ve kamusal kullanım çeşitliliğini artıran bir tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Öneri kapsamında kıyı boyunca kesintisiz yaya dolaşımı sağlanması, ekolojik sürekliliği destekleyen bitkisel bantların oluşturulması, liman ve kıyı kullanım alanlarının yeniden kurgulanması, yeme-içme ve satış birimleri, iskeleler, dinlenme alanları, kumsal düzenlemeleri, çocuk oyun alanları, amfi, meydan ve oturma birimleri gibi kamusal kullanım odaklarının entegre edildiği çok işlevli bir kıyı sistemi önerilmiştir. Sonuç olarak çalışma, Tirilye kıyı bandında ekolojik bağlantılılık, mekânsal süreklilik, sosyal etkileşim, kullanıcı konforu ve yerel kimliği bütünleştiren sürdürülebilir bir peyzaj tasarım yaklaşımı ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, kıyı alanlarının yalnızca rekreatif yüzeyler değil, ekolojik ve kültürel sürekliliği destekleyen bütüncül kentsel sistemler olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kıyı peyzajı, kamusal mekân kullanımı, sürdürülebilir peyzaj tasarımı

**A LANDSCAPE DESIGN PROPOSAL FOR CONNECTIVITY AND PUBLIC SPACE
INTEGRATION IN COASTAL AREAS: THE TIRILYE CASE STUDY**

Abstract

Addressing ecological connectivity alongside public space use in coastal landscapes offers a holistic and multi-layered approach to the sustainable design of coastal zones. This study aims to evaluate the relationship between spatial organization and public use within an ecological and urban context, focusing on the coastal strip of Tirilye (Zeytinbağı) in Mudanya, Bursa. Coastal areas are valuable transition zones situated at the intersection of terrestrial and marine ecosystems, characterized by ecological, spatial, cultural, and social significance. These areas serve as threshold spaces that accommodate diverse typologies of use, sustain public life, and shape the waterfront-city relationship. Within this framework, the research is structured around the concepts of coastal zones, ecological connectivity, spatial continuity, multi-layered spatial interaction, and the quality of public space. The study area comprises the 46,451 m² coastal strip of Tirilye along the Sea of Marmara. The research analyzes climatic attributes, wind regimes, topographic structure, demographic status, flora and fauna composition, land use patterns, transportation networks, conservation status, and noise levels. The resulting data are evaluated to reveal the spatial potentials and constraints of the site. Tirilye's historical and cultural identity, waterfront-city dynamics, and natural landscape character are treated as the core determinants of the design process. Preserving the conservation-utilization balance, a landscape design approach is developed to support coastal ecosystem continuity and enhance public use diversity. The proposal introduces a multifunctional coastal system integrating uninterrupted pedestrian circulation, ecological buffer strips, reconfigured harbor and waterfront zones, dining and commercial units, piers, recreational areas, beach arrangements, playgrounds, an amphitheater, squares, and seating components. Consequently, this study presents a sustainable coastal landscape design approach that integrates ecological connectivity, spatial continuity, social interaction, user comfort, and local identity in the Tirilye coastal strip. This approach emphasizes that coastal areas should be treated not merely as recreational surfaces, but as integrated urban systems that sustain ecological and cultural continuity.

Keywords: Coastal landscape, public space use, sustainable landscape design

3. Giriş

Kıyılar, iklim, jeolojik yapı, hidrolojik süreçler ile flora ve fauna etkileşiminin bir araya gelmesiyle oluşan peyzaj sistemleri olarak tanımlanmaktadır (Ghermandi ve Nunes, 2013). Tarihsel süreç içerisinde kıyılar; yerleşim, ticaret ve ulaşımın yoğunlaştığı stratejik gelişim alanları olarak önem kazanmıştır (Demir, 2018).

Kıyı alanları; taşkın kontrolü, erozyonun önlenmesi ve çevre kirliliğinin azaltılması gibi ekolojik işlevleriyle kentsel sistemlere katkı sağlayan, yüksek rekreasyon potansiyeline sahip önemli mekânsal kaynaklardır (Şerbetçi, 2018). Bu kapsamda kıyı alanlarının temel kullanım ve işlevleri şu şekilde sınıflandırılmaktadır (Arslan, 1988):

- Liman, endüstri ve yerleşim alanları
- Su ürünleri üretim ve kullanım alanları
- İklimsel avantajlara bağlı yerleşimler
- Tarımsal kullanım alanları
- Rekreasyon ve turizm alanları

Ekolojik bağlantılık, peyzajın mekânsal ve ekolojik bütünlüğünü destekleyerek doğal sistemlerin sürekliliğini koruyan ve ekosistem dengesini sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda güçlendiren bir yaklaşımdır (Carlier ve Moran, 2019). Kara-su etkileşiminin yoğun olduğu kıyı alanlarında bu süreklilik daha kritik hale gelmekte; habitat parçalanmasının azaltılması hem ekolojik süreçlerin hem de insan kullanımının sürdürülebilirliği açısından belirleyici olmaktadır (Santos ve ark., 2019).

Yeşil koridorlar, kıyı yeşil yolları ve yeşil kuşaklar; ekolojik sürekliliği destekleyen ve kullanıcı hareketliliğini yönlendiren temel peyzaj omurgalarıdır (Taylor ve ark., 1995; Meerow ve Newell, 2017). Bu sistemler:

- Parçalanmış habitatlar arasında ekolojik köprüler oluşturur.
- İnsan hareketliliğini yönlendirir.
- Kara-su ekosistem etkileşimini güçlendirir.
- Ekolojik bütünlük ile kamusal kullanım arasında denge kurarak kıyı peyzajlarının sürdürülebilir değerini artırır (Oh ve ark., 2011; Cobbinah ve ark., 2015; Santos ve ark., 2019).

Kamusal mekânlar, toplumun ortak kullanımına açık, sosyal etkileşimi ve kamusal bütünleşmeyi destekleyen kentsel alanlardır (Kılıç ve ark., 2014).

Kıyı alanlarındaki kamusal mekânlar ise kente nefes aldırarak, dinlenme ve sosyalleşme imkânı sunan önemli açık alanlardır. Bu alanlarda kamusal mekân kullanımı; bireylerin doğayla doğrudan temas kurduğu, yürüyüş, dinlenme, spor ve sosyal etkinlikler aracılığıyla kentsel yaşamın aktif bir parçası haline geldiği kullanım biçimlerini kapsamaktadır (Abay ve Erdönmez, 2021).

Kıyı kamusal alanlarında temel amaç suya erişimi artırmak ve kent-su ilişkisini güçlendirmektir (Üzümcüoğlu ve ark., 2024). Bu doğrultuda kıyı mekânları şu başlıklarda ele alınmaktadır:

- Erişilebilirlik: Kent-kıyı bağlantısı ve süreklilik (Lynch, 1960; Gehl, 2011).
- Kıyı imgesi: Kimlik ve kentsel uyum (Lynch, 1960; Carmona, 2019).
- Aktivite: Rekreatif ve suya bağlı kullanım çeşitliliği (Jacobs, 1961; Gehl, 2011).
- Sosyallik: Yaya hareketliliği ve kullanıcı çeşitliliği (Whyte, 1980; Gehl, 2011).
- Güvenlik: Fiziksel tasarım ve yönetimle güvenli alan oluşumu (Jacobs, 1961; Carmona, 2019).

4. Materyal ve Yöntem

Tirilye, Bursa'nın 40 km batısında, Mudanya'ya bağlı tarihî bir kıyı yerleşimidir. Marmara kıyısında yer alan bu yerleşim, Eski Yunanlılar, Frigyalılar, Lidyalılar, Persler, Makedonyalılar, Romalılar, Bizanslılar ve Osmanlılara ev sahipliği yapmıştır (Demir, 2019).

14. yüzyıla kadar Bizans yerleşimi olan Tirilye, Osmanlı döneminde Türk-Rum nüfusun birlikte yaşadığı çok kültürlü bir kasaba niteliği kazanmıştır (Akıncıtürk, 2022).

Çalışma alanı, Bursa ilinin Mudanya ilçesine bağlı Tirilye (Zeytinbağı) yerleşiminin kıyı bandında yer almaktadır (Şekil 1). Yaklaşık 46.451 m² büyüklüğe sahip olan alan, Marmara Denizi'nin güney kıyısında, 40°23' kuzey enlemi ve 28°47' doğu boylamı arasında konumlanmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı konumu (Orijinal, 2026)

Tirilye kıyı şeridi; tarihi dokusu, doğal peyzaj değerleri ve kıyı-kent ilişkisini koruyan özgün morfolojisiyle yüksek kamusal potansiyele sahip bir geçiş alanıdır. Açık alanlar ile yapılaşmanın iç içe geçtiği bu hat, çok katmanlı bir kullanım deneyimi sunarak kentsel kimliğin önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

Nüfus: Tirilye’de nüfus yapısı incelendiğinde genç nüfusun %16,41, orta yaş grubunun %44,85 ve yaşlı nüfusun %38,73 oranında olduğu görülmektedir (URL-1). Bu dağılım, alanın ağırlıklı olarak orta ve ileri yaş kullanıcıların ihtiyaçlarına göre şekillendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda tasarım kararlarında erişilebilirlik, konfor ve dinlenme odaklı kamusal mekân kurgusu önceliklendirilmelidir.

Rüzgâr: Alanda hâkim rüzgârların özellikle doğu (90°) ve kuzeydoğu yönlerinden etkili olduğu görülmektedir (Global Wind Atlas, 2026). Bu veriler doğrultusunda tasarım sürecinde kullanıcı konforunu artırmak amacıyla açık ve yarı açık mekânların konumlandırılması, oturma alanlarının yönlendirilmesi ve bitkisel tampon bölgelerin oluşturulması gibi tasarım kararlarında belirleyici rol oynamaktadır.

Sıcaklık ve Yağış: Tirilye’de yaz aylarında sıcaklıkların arttığı ve yağış miktarının azaldığı, kış aylarında ise yağışların yoğunlaştığı görülmektedir (Meteoblue, 2026). Bu durum, bölgenin Akdeniz iklimi karakteri taşıdığını göstermekte olup, tasarım sürecinde gölgeleme, su yönetimi ve mevsimsel kullanım kararlarının şekillenmesinde etkili olmaktadır.

Bu çalışmada, Tirilye kıyı şeridinin mevcut potansiyellerinin değerlendirilmesi ve kıyı-kent ilişkisini güçlendiren bir peyzaj tasarım önerisinin geliştirilmesi amacıyla üç aşamalı bir yöntem yaklaşımı benimsenmiştir. Araştırma süreci; çalışma alanının mevcut durumunun analiz edilmesi, elde edilen veriler doğrultusunda peyzaj tasarım yaklaşımı ve tasarım kararlarının oluşturulması ve son olarak peyzaj tasarım önerisinin geliştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır.

Çalışma Alanının Mevcut Durumuna Yönelik Analizlerin Gerçekleştirilmesi

Araştırmanın ilk aşamasında, Tirilye kıyı şeridinin mevcut fiziksel, ekolojik ve sosyal özelliklerinin ortaya konulması amacıyla kapsamlı bir alan analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen sörvey çalışması ile alanın mevcut kullanım biçimleri, mekânsal ilişkileri ve kullanıcı deneyimine yönelik veriler yerinde gözlem yöntemiyle değerlendirilmiştir. Alan içerisindeki ve çevresindeki mevcut yapılar, ulaşım bağlantıları, yaya ve araç erişimi, gürültü kaynakları ve koruma statüsüne sahip bölgeler incelenmiştir.

Elde edilen veriler doğrultusunda çalışma alanının mevcut durumunu değerlendirmek amacıyla SWOT analizi uygulanmış; alanın güçlü ve zayıf yönleri ile sahip olduğu fırsatlar ve karşı karşıya

olduğu tehditler belirlenmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen analizler, alanın potansiyellerinin ortaya çıkarılması ve tasarım sürecine yön verecek temel girdilerin oluşturulması amacıyla değerlendirilmiştir.

Peyzaj Tasarım Yaklaşımı ve Tasarım Kararlarının Oluşturulması

Araştırmanın ikinci aşamasında, mevcut durum analizlerinden elde edilen bulgular doğrultusunda çalışma alanına yönelik peyzaj tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Tasarım kararları oluşturulurken kıyı alanlarının ekolojik bağlantılılığı, kamusal kullanım potansiyeli ve kullanıcı gereksinimleri temel değerlendirme kavramları olarak ele alınmıştır.

Bu kapsamda kıyı ve doğal peyzaj ilişkisini güçlendiren yaklaşımlar, yaya dolaşımının sürekliliği, erişilebilir ve nitelikli kamusal açık alanların oluşturulması, liman ve kıyı kullanımlarının bütünleştirilmesi, sosyal etkileşimi destekleyen mekânsal organizasyonlar ve Tirilye'nin tarihsel-kültürel kimliğini yansıtan tasarım kararları geliştirilmiştir. Belirlenen kararlar, alanın mevcut değerlerini koruyan ve kullanıcı deneyimini iyileştiren bütüncül bir peyzaj tasarım yaklaşımı çerçevesinde ele alınmıştır.

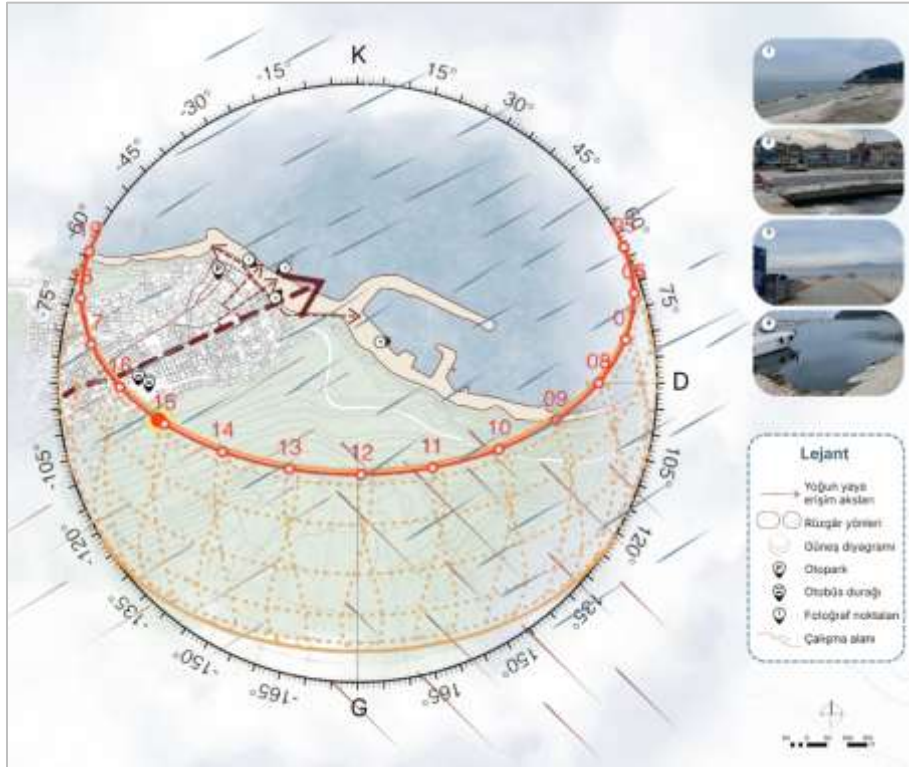
Peyzaj Tasarım Önerisinin Oluşturulması

Araştırmanın son aşamasında, belirlenen tasarım yaklaşımı ve kararları doğrultusunda Tirilye kıyı şeridine yönelik peyzaj tasarım önerisi oluşturulmuştur. Tasarım sürecinde alanın doğal ve kültürel özellikleri dikkate alınarak kıyı kullanımlarının çeşitlendirilmesi, kamusal mekân sürekliliğinin sağlanması ve kullanıcıların farklı gereksinimlerine cevap verebilecek mekânsal organizasyonların geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda hazırlanan peyzaj tasarım önerisi; kıyı kullanımları, rekreasyon alanları, yaya bağlantıları, sosyal kullanım alanları ve peyzaj düzenlemelerini içeren bütüncül bir planlama yaklaşımı ile geliştirilmiştir. Elde edilen tasarım çıktıları, Tirilye kıyı alanının ekolojik, sosyal ve mekânsal değerlerini destekleyen uygulanabilir bir peyzaj tasarım modeli olarak değerlendirilmiştir.

5. Bulgular ve Tartışma

Çalışma alanının fiziksel ve çevresel karakterini anlamak adına yürütülen sörvey çalışması, kıyı şeridi ile yerleşim dokusunun birleştiği yapıyı ortaya koymaktadır (Şekil 2). Eğimli bir topoğrafya üzerine kurulu olan yerleşim dokusu, kuzey yönündeki deniz sınırı ve korunaklı liman yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Sahadaki mikroklimatik dinamikler incelendiğinde, alana hâkim rüzgâr yönlerinin denizden karaya doğru (kuzeydoğu eksenli) yöneldiği ve güneşlenme eğrisinin gün boyunca güney yamaçlardan kıyı hattına doğru bir iz bıraktığı görülmektedir. Kentsel hareketlilik bağlamında yoğun yaya erişim aksları, yerleşim içinden geçerek liman bölgesine ve sahil şeridine doğru yönlenebilmektedir. Alandaki mekânsal algıyı, morfolojik yapıyı ve kıyı ilişkisini belgelemek amacıyla belirlenen dört farklı odak noktasından alınan fotoğraflar ise sörvey çalışmasının görsel verilerini oluşturmaktadır.



Şekil 2. Sörvey çalışması (Orijinal, 2026)

Flora ve Fauna

Tirilye (Zeytinbağı), Marmara Denizi'nin güney kıyısında Akdeniz ikliminin etkisiyle gelişen kıyı ve maki vejetasyonuna sahiptir. Bitki örtüsü zeytinlikler ile doğal maki türlerinden oluşmakta; başlıca türler *Olea europaea*, *Laurus nobilis*, *Pinus brutia* ve *Quercus coccifera*'dır (Daşkın, 2012). Kıyı ve tarım alanlarının sunduğu yaşam ortamları, zengin bir fauna çeşitliliğini desteklemektedir. Alanda martı, karabatak ve göçmen kuş türlerinin yanı sıra tilki, kirpi, tavşan ve yaban domuzu gibi memeli türleri gözlenmektedir (Gözütok, 2017).

Mevcut Yapılar

Tirilye yerleşimindeki yapılar; tescilli sivil mimari yapılar, tescilli anıtsal yapılar, tescilli endüstri yapıları, ticari alanlar ve eğitim kurumu başlıkları altında incelenmiştir. Analizler, özellikle ticari alanlar ile tescilli sivil mimari yapıların yerleşim dokusunda yoğunlaştığını göstermektedir. Yerleşimde tek eğitim kurumu Tirilye İlkokulu'dur. Ayrıca tarihsel kimliği güçlendiren tescilli anıtsal yapıların varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Mevcut yapılar (Orijinal, 2026)

Ulaşım

Tirilye'de iç dokudan kıyı bandına uzanan birinci, ikinci ve üçüncü derece yollardan oluşan bir sirkülasyon kademelenmesi tespit edilmiştir. Ulaşım yoğunluğu, taşıt ve toplu taşıma kullanımı nedeniyle özellikle birinci ve ikinci derece yollarda görülmektedir. Güneybatıda 1 otopark ile ana yol üzerinde 2 otobüs durağı, alanın ulaşım altyapısındaki diğer unsurlardır (Şekil 4).



Şekil 4. Ulaşım (Orijinal, 2026)

Gürültü Kaynakları

Proje alanının güneyinde, Tirilye yerleşimine yakın kıyı bandında ve liman bölgesinde belirgin bir ses yoğunluğu tespit edilmiştir. Bu yoğunluk, kıyıya yakın kesimlerdeki ticari kullanım kaynaklı hareketlilik ile liman bölgesinde tekne, bot ve balıkçı teknelerinin sürekli işleyişinden kaynaklanmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Gürültü kaynakları (Orijinal, 2026)

Korunan Alanlar

Proje alanı ve yakın çevresinde iki temel koruma statüsü yer almaktadır. Kıyı çizgisinin batı tarafı ve iç kesimleri “Nitelikli Doğal Koruma Alanı”, liman bölgesi ve doğu kıyı bandı ise “Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı” kapsamında korunmaktadır (URL-2) (Şekil 6).



Şekil 6. Korunan alanlar (Orijinal, 2026)

Çalışma alanına ilişkin gerçekleştirilen SWOT analizi kapsamında, alanın mevcut potansiyelleri ve kısıtlayıcı unsurları değerlendirilmiş; güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler olmak üzere dört temel başlık altında elde edilen bulgular Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. SWOT analizi sonucunda elde edilen bulgular (Orijinal, 2026)

Güçlü yönler	Zayıf yönler	Fırsatlar	Tehditler
• Liman çevresindeki kullanıcı hareketliliği alanın aktif kullanım potansiyelini artırmaktadır. • Düşük ses yoğunluğuna sahip bölgeler dinlenme odaklı kullanımlar için uygunluk göstermektedir. • Mevcut kıyı kullanımları mekânsal hareketliliği desteklemektedir. • Açık görüş açalarına sahip alanlar kullanıcı deneyimini güçlendirmektedir.	• Gürültü yoğunluğunun belirli bölgelerde toplanması kullanıcı konforunu azaltmaktadır. • Bazı bölgelerdeki taşıt etkisi yaya deneyimini olumsuz etkilemektedir. • Yoğun kullanıcı hareketliliği bazı alanlarda mekânsal baskı oluşturmaktadır. • Kesintisiz yaya bağlantılarının eksikliği kullanım sürekliliğini zayıflatmaktadır. • Araç etkisinin hissedildiği	• Ticari alan yoğunluğu kamusal kullanım senaryolarını geliştirme imkânı sunmaktadır. • Birinci derece yol güçlü erişim bağlantıları oluşturmaktadır. • İkinci derece yollar alternatif kullanıcı girişleri geliştirme potansiyeli sunmaktadır. • Toplu taşıma duraklarının varlığı erişilebilirliği artırmaktadır. • Yerleşim dokusuyla kurulan ilişki mekânsal bütünlük	• Alan dışı yolların kıyı bandına doğrudan ve denetimsiz bağlanması araçların yaya alanlarına nüfuz etmesine yol açmaktadır. • Otopark yetersizliği araçların kıyı çeperini ve tarihî doku çevresini düzensiz işgal etmesine neden olmaktadır. • Deniz ve yerleşim arasındaki tarihi ilişkinin ulaşım baskısıyla zayıflaması kıyının mekânsal karmaşaya

• Rekreasyon kullanımına uygun boşluklar esnek tasarım kararlarına olanak sağlamaktadır. • Sahil boyunca devam eden mekânsal süreklilik yaya kullanımını desteklemektedir. • Sessiz bölgelerin varlığı sakin kullanım senaryoları için potansiyel oluşturmaktadır. • Kıyı boyunca değişen kullanım yoğunlukları farklı mekânsal deneyimler sunmaktadır. • Doğal karakteri korunan bölgeler ekolojik süreklilik açısından avantaj sağlamaktadır.	bölgeler rekreasyon kullanımını sınırlamaktadır. • Sürekli ses etkisi uzun süreli kullanım potansiyelini düşürmektedir. • Sirkülasyonun belirli akslarda yoğunlaşması bazı kıyı alanlarını geri planda bırakmaktadır. • Gölgeleme ve konfor elemanlarının yetersizliği uzun süreli kullanımı azaltmaktadır.	oluşturma fırsatı vermektedir. • Tarihî çevre ile bağlantı kimlik odaklı tasarım yaklaşımını desteklemektedir. • Mevcut ulaşım omurgası yönlendirilmiş yaya aksları oluşturma imkânı sunmaktadır.	dönüşmesine yol açmaktadır. • Yerleşimden sahile inen yaya akslarının fiziksel engellerle kesintiye uğraması yaya akışını zayıflatmaktadır. • Yamaçlardaki kontrolsüz arazi kullanımı heyelan riskini artırarak kıyı güvenliğini tehdit etmektedir. • Tarımsal alanların plansız kullanımı yüzey suyu akışını değiştirerek ekolojik dengeyi bozmaktadır. • Ticarileşmeye odaklı yapılaşmalar yeşil tampon alanların yok olmasına ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açmaktadır.

Geliştirilen tasarım yaklaşımı, mekânsal organizasyon, kullanıcı hareketleri ve kullanım senaryolarını bütüncül bir sistem anlayışı içerisinde ele almaktadır. Tasarımın temelini; kıyı ve doğal peyzaj arasındaki ekolojik ve mekânsal sürekliliğin güçlendirilmesi, yaya erişiminin kesintisiz bir dolaşım ağı olarak kurgulanması ve kamusal açık alanlar arasında bağlantılı bir kullanım örüntüsünün oluşturulması oluşturmaktadır. Bu doğrultuda kıyı bandı boyunca önerilen liman, meydan, amfi ve dinlenme alanları; kullanıcıların farklı rekreasyonel gereksinimlerine yanıt veren, sosyal etkileşimi destekleyen ve kıyı ile sürekli görsel ve fiziksel ilişki kurmalarını sağlayan mekânsal odaklar olarak tasarlanmıştır (Şekil 7). Yaya dolaşımı, kıyı boyunca süreklilik gösteren bir bağlantı sistemi olarak ele alınmış; aktif hareket alanları ile dinlenme ve etkileşim noktaları arasında dengeli bir ilişki kurulmuştur. Böylece alan, yalnızca fiziksel bir kıyı düzenlemesi olmanın ötesinde, doğal süreçleri, kamusal kullanımı ve sosyal yaşamı bütünleştiren, kullanıcı odaklı ve sürdürülebilir bir kıyı peyzajı modeli olarak geliştirilmiştir.



Şekil 7. Mekânsal kurgu yaklaşımı (Orijinal, 2026)

6. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında, kıyı alanlarında ekolojik bağlantılılık ve kamusal mekân kullanımının birlikte ele alınması gerektiği ortaya konulmuş ve Tirilye kıyı bandı özelinde bütüncül bir peyzaj tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen alan analizleri, Tirilye kıyısının yalnızca rekreasyonel kullanım potansiyeline sahip bir açık alan olmadığını; aynı zamanda tarihsel doku, doğal peyzaj değerleri ve kara-su ekosistem ilişkisi açısından önemli bir geçiş alanı niteliği taşıdığını göstermiştir. Bu doğrultuda kıyı alanlarının sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için fiziksel düzenlemelerin ötesinde, ekolojik süreçleri destekleyen ve kullanıcı deneyimini geliştiren çok katmanlı tasarım yaklaşımlarına ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

Kıyı ile yerleşim arasındaki mekânsal sürekliliğin yeterince güçlendirilememesi, ulaşım bağlantılarındaki kopukluklar, kullanıcı gereksinimlerine cevap veren nitelikli kamusal alan eksikliği ve farklı kullanım alanları arasındaki ilişki sorunları alanın temel kısıtlayıcı unsurları olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen tasarım yaklaşımı, mevcut doğal ve kültürel değerleri koruyarak kıyı-kent ilişkisini güçlendirmeyi, ekolojik bağlantılığı desteklemeyi ve kullanıcıların kıyı alanından daha etkin yararlanmasını sağlamayı amaçlamıştır.

Tasarım önerisi kapsamında oluşturulan yaya bağlantıları, yeşil süreklilikler ve kamusal kullanım odakları; kıyı boyunca parçalı durumda bulunan mekânsal ilişkilerin bütünleştirilmesine yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Liman, meydan, amfi, dinlenme alanları ve rekreasyon kullanımlarının birbiriyle ilişkili şekilde kurgulanması, kıyı alanının yalnızca geçiş güzergâhı olarak değil, sosyal etkileşimi destekleyen aktif bir kamusal yaşam alanı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda çalışma, kıyı peyzajlarının tasarımında ekolojik bağlantılılık ile kamusal kullanım gereksinimlerinin birbirinden bağımsız değil, karşılıklı olarak desteklenen iki temel tasarım bileşeni olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tirilye örneği üzerinden geliştirilen yaklaşım, tarihsel ve doğal değerleri yüksek olan küçük ölçekli kıyı yerleşimlerinde uygulanabilecek bütüncül bir tasarım modeli olarak değerlendirilebilir. Özellikle koruma statüsüne sahip kıyı alanlarında, doğal peyzaj karakterinin korunması ve kullanıcı erişiminin dengeli biçimde sağlanması önem taşımaktadır. Bu doğrultuda kıyı alanlarının gelecekteki planlama süreçlerinde yalnızca fiziksel kullanım alanları olarak değil, ekolojik sistemlerin devamlılığını sağlayan ve toplumsal yaşamı destekleyen dinamik peyzaj sistemleri olarak ele alınması gerekmektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

Kıyı alanlarında gerçekleştirilecek yeni tasarım ve planlama çalışmalarında, kara ve deniz ekosistemleri arasındaki bağlantıyı güçlendiren yeşil koridorlar, kıyı bitkilendirme alanları ve doğal geçiş zonları öncelikli tasarım bileşenleri olarak değerlendirilmelidir.

Tirilye gibi tarihsel ve doğal peyzaj değerleri yüksek olan kıyı yerleşimlerinde, yeni kullanım kararları oluşturulurken mevcut peyzaj karakteri korunmalı; yapılaşma baskısını artıracak müdahaleler yerine düşük etkili ve doğa ile uyumlu tasarım yaklaşımları benimsenmelidir.

Kullanıcı profili ve demografik yapı dikkate alınarak, özellikle orta ve ileri yaş kullanıcıların erişilebilirlik, güvenlik ve konfor gereksinimlerini karşılayan engelsiz dolaşım sistemleri, dinlenme alanları ve örtü sistemleri artırılmalıdır.

Kıyı boyunca yaya sürekliliğinin sağlanması amacıyla ulaşım bağlantıları güçlendirilmeli; araç odaklı kullanımlar sınırlandırılarak yaya öncelikli kamusal alan organizasyonları geliştirilmelidir.

Kıyı alanlarında gerçekleştirilecek tasarım uygulamalarında bölgenin doğal bitki örtüsüyle uyumlu, iklim koşullarına dayanıklı ve ekolojik işlevleri destekleyen bitki türleri tercih edilerek biyolojik çeşitliliğin korunmasına katkı sağlanmalıdır.

Gelecekte yapılacak araştırmalarda, önerilen tasarım yaklaşımının kullanıcı memnuniyeti, ekolojik performans ve mekânsal kullanım yoğunluğu açısından uzun dönemli izleme çalışmalarıyla değerlendirilmesi, kıyı peyzajlarının sürdürülebilir tasarım kriterlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Abay, E., & Erdönmez, E. (2021). Kent İle Kıyı Arasında Kamusal Mekân Kalitesinin Frankfurt-Main Örneği Üzerinden İncelenmesi. *Kent Akademisi*, 14(4), 1117-1136.
- Akıncıtürk, N. (2002). Zeytinbağı "Tirilye", Mimarisi ve Taş Mektep Yapısal Özellikleri, I. Bursa Halk Kültürü Sempozyumu, 4-6 Nisan 2002, Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü, Bursa, Cilt 1, s.242-256
- Arslan, M. (1988). Kıyısız Yerleşimlerin ve Liman Kentlerinin Planlamasındaki Temel Sorunlar, *Peyzaj Mimarlığı Bölümü*, Ankara.
- Carlier, J., & Moran, J., (2019). Landscape typology and ecological connectivity assessment to inform greenway design. *Sci. Total Environ.* 651, 3241-3252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.077>.
- Carmona, M. (2019). Principles for public space design, planning to do better. *Urban Design International*, 24(1), 47-59. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0070-3>
- Cobbinah, PB., Erdiaw-Kwasie, MO., Amoateng, P. (2015). Rethinking sustainable development within the framework of poverty and urbanisation in developing countries. *Environ Dev* 13:18-32.
- Daşkın, R. (2012). Vascular Plants of Mudanya Cost Bursa, South Marmara/Turkey. *Biological Diversity and Conservation*, 5(3), 28-36.
- Demir, K.A. (2018). Bütünleşik kıyı alanları yönetimi bağlamında kıyı kentleşmeleri. *Yönetim ve Ekonomi*, 25 (2), 409-426.
- Demir, M. (2019). Tirilye Eskipazar Caddesi Koruma Önerileri. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gehl, J. (2011). *Life between Buildings: Using Public Space*. Washington DC: Island Press.
- Ghermandi, A., & Nunes, P.A.L.D. (2013). A global map of coastal recreation values: Results from a spatially explicit meta-analysis. *Ecological Economics*. 86,1-15.
- Global Wind Atlas. (2026). Global wind atlas. (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2026)
- Gözütok, S. (2017). Bursa İli Memeli (Classis: Mammalia) Faunası ve Türlerin Koruma Statüleri. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 3(2), 120-130. <https://doi.org/10.24180/ijaws.320870>
- Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American Cities*. New York: Random House.
- Dinç, G. & Gül, A. (2022). Estimation of effective spatial variables when visiting public squares through factor analysis model. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(3), p.25-36. 04022022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000844](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000844)
- Kılıç, A., Akın, O., Koç, E. (2014). "Kıyı Alanlarına Yönelik Yasal Ve Yönetmelik Çerçevesinin Planlama Yansımaları: Yasalar, Kurumlar Ve Parçalanmış Kıyı Mekânı", *Bildiri Kitabı*, 8. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 7-8 Kasım 2014, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, ss. 435-454.

- Lynch, K. (1960). *The Image of the City*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Meerow S., & Newell J. P. (2017). Spatial Planning for Multifunctional Green Infrastructure: Growing Resilience in Detroit. In: *Landscape and Urban Planning*, 159, pp. 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.005>.
- Meteoblue. (2026). Zeytinbağı, Türkiye: Climate modelled data. (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2026)
- Oh K, Lee D, Park C. (2011). Urban ecological network planning for sustainable landscape management. *J Urban Technol.* 18(4):39-59. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.648433>
- Santos, M., Cagnolo, L., Roslin, T., Marrero, H. J., & Vázquez, D. P. (2019). Landscape connectivity explains interaction network patterns at multiple scales. *Ecology*, 100(11), e02883.
- Şerbetci, Z. (2018). Bursa kentinde mekânın kullanımını etkileyen doğal faktörlerin irdelenmesi. *Zeitschrift Für Die Welt Der Türken / Journal of World of Turks*, 10 (2), 207-224.
- Taylor, J., Paine, C., FitzGibbon, J., (1995). From greenbelt to greenways: four Canadian case studies. *Landscape and Urban Planning* 33, 47-64.
- URL-1. <https://www.endeksa.com/tr/analiz/turkiye/bursa/mudanya/tirilye/demografi> (Erişim tarihi: 09.05.2026)
- URL-2 <https://webdosya.csb.gov.tr/db/turkce/sitalani/kumyaka-tirilye--8230-40393-20200318114255.pdf> (Erişim tarihi: 05.05.2026)
- Üzümcüoğlu, D., & Polay, M. (2024). Insights into Girne Ancient Harbor: Analyzing the Landscaping in Historical Coastal Context with Urban Waterfront Development Principles. *İDEALKENT*, 16(43), 362-392. <https://doi.org/10.31198/idealkent.1350893>
- Whyte, W. H. (1980). *The social life of small urban spaces*. Washington DC: The Conservation Foundation.

**KAMUSAL AÇIK ALANLARDA SOSYAL ETKİLEŞİMİ GÜÇLENDİREN PEYZAJ
TASARIM PARAMETRELERİ**

Ceren KARABURUN

Bursa Uludağ University, Institute of Science, Department of Landscape Architecture, Bursa-Türkiye

Email: 502530005@ogr.uludag.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-1972-1516>

Prof. Dr. Elvan ENDER ALTAY

Bursa Uludağ University, Faculty of Agriculture, Department of Landscape Architecture, Bursa-Türkiye

Email: elvanender@uludag.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5933-1611>

Özet

Kamusal alanlar, kent yaşamının toplumsal, kültürel ve mekânsal örgütlenmesinde kritik rol oynayan; bireylerin bir araya geldiği, etkileşim kurduğu ve kentle aidiyet ilişkisi geliştirdiği temel mekânlardır. Bu çalışma, kamusal alanlarda sosyal etkileşimi belirleyen tasarım ölçütlerini kuramsal bir çerçevede ele alarak, söz konusu ölçütlerin kentsel planlama ve tasarım süreçlerindeki yönlendirici rolünü ortaya koymayı amaçlamaktadır. Araştırma, kamusal alan literatüründe öne çıkan kuramsal yaklaşımlar ve temel düşünürlerin (kentsel yaşam, kamusal mekân ve sosyal etkileşim odağındaki) görüşleri üzerinden yapılandırılmıştır. Bu bağlamda sosyal etkileşimi destekleyen beş temel tasarım ölçütü tanımlanmıştır: erişilebilirlik ve kapsayıcılık, insan ölçeğinde konfor, güvenlik ve gözetim, sosyal canlılık ve işlevsellik ile estetik kalite ve yerel kimlik. Erişilebilirlik ve kapsayıcılık, kamusal alanların farklı yaş, cinsiyet, sosyo-ekonomik ve fiziksel özelliklere sahip kullanıcılar için eşit erişilebilir olmasını vurgulamaktadır. İnsan ölçeğinde konfor, mekânın fiziksel, duyuşal ve psikolojik konfor koşullarını kapsayarak kullanıcı deneyimini güçlendirmektedir. Güvenlik ve gözetim, mekânsal tasarım ve doğal gözetim mekanizmaları üzerinden kullanıcıların algılanan ve gerçek güvenlik düzeyini artırmaktadır. Sosyal canlılık ve işlevsellik, farklı kullanım senaryoları ve etkinlik çeşitliliği ile kamusal alanların gün boyu aktif kalmasını desteklemektedir. Estetik kalite ve yerel kimlik ise mekânın özgün karakterini güçlendirerek kullanıcılar ile mekân arasında duygusal bir bağ kurulmasına katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak çalışma, bu beş temel ölçütün kamusal alanların tasarımında bütüncül bir yaklaşım sunabileceğini ortaya koymakta; daha kapsayıcı, güvenli, yaşanabilir ve sosyal etkileşimi yüksek kentsel mekânların oluşturulması için kuramsal bir rehber niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kamusal Alan, Sosyal Etkileşim, Erişilebilirlik ve Kapsayıcılık, Kentsel Tasarım, Mekân Kimliği.

**LANDSCAPE DESIGN PARAMETERS FOR ENHANCING SOCIAL INTERACTION IN
PUBLIC OPEN SPACE**

Abstract

Public spaces are fundamental urban environments where individuals come together, establish social relations, develop a sense of belonging, and shape the dynamics of urban life. This study aims to examine the criteria that support social interaction in public spaces within a theoretical framework and to highlight their significance in planning and design processes. The research is based on a review of key theoretical approaches in the literature on public space, focusing on influential scholars who have contributed to the understanding of urban life and social interaction. Within this framework, five core design criteria that influence social interaction in public spaces are identified: accessibility and inclusiveness, human-scale comfort, safety and surveillance, social vitality and functionality, and aesthetic quality and local identity. Accessibility and inclusiveness ensure equitable and easy access to public spaces for diverse user groups. Human-scale comfort refers to spatial qualities that address users' physical, sensory, and psychological needs. Safety and surveillance encompass design strategies that enhance both perceived and actual safety within public environments. Social vitality and functionality emphasize spatial diversity that enables multiple activities and user profiles to coexist, thereby sustaining continuous urban activity. Finally, aesthetic quality and local identity strengthen the distinctive character of space and foster emotional connections between users and place. In conclusion, the study argues that these five criteria provide a comprehensive framework for guiding the planning and design of public spaces. They contribute to the creation of more inclusive, livable, and socially vibrant urban environments by reinforcing social interaction as a core design principle.

Keywords: Public Space, Social Interaction, Accessibility and Inclusivity, Urban Design, Place Identity.

1. Giriş

Günümüzde hızlı kentleşme ve değişen kullanıcı gereksinimleri, kamusal alanların yalnızca fiziksel değil, sosyal açıdan da nitelikli olarak tasarlanmasını gerekli kılmaktadır. Kamusal alan; insanların günlük yaşamlarını sürdürdükleri, bir araya geldikleri ve sosyal ilişkiler kurdukları ortak kullanım mekânlarıdır. Sokaklar, meydanlar, parklar ve açık kent mekânları bu kapsamda değerlendirilmektedir (Carr vd., 1992; Carmona vd., 2010). Ali Madanipour kamusal alanı, kent yaşamının sosyal ve mekânsal ilişkilerini barındıran ortak bir zemin olarak tanımlamaktadır (Madanipour, 1996). Bu alanlar yalnızca fiziksel boşluklar değil, aynı zamanda kent kimliğini oluşturan sosyal yaşam alanlarıdır (Madanipour, 1996; Gehl, 2011; Montgomery, 1998).

Kamusal alanların en temel işlevlerinden biri sosyal etkileşimi desteklemesidir. İnsanların karşılaşması, konuşması, birlikte vakit geçirmesi ve ortak deneyimler üretmesi kamusal yaşamın canlılığını oluşturmaktadır (Whyte, 1980; Gehl, 2011). Jan Gehl, kamusal mekânların "binalar arasındaki yaşamı" oluşturduğunu belirtirken, Jane Jacobs aktif sokakların güvenli ve canlı kent yaşamının temelini oluşturduğunu vurgulamaktadır (Gehl, 2011; Jacobs, 1961).

Sosyal etkileşim; aidiyet duygusunu, toplumsal bütünleşmeyi ve kent kültürünü güçlendirmektedir (Putnam, 2000; Madanipour, 2003; Carmona vd., 2010). Sosyal etkileşim, bireylerin birbirlerinin davranışlarından haberdar olarak karşılıklı etki ve tepki geliştirdikleri toplumsal süreçtir. Kamusal alan bağlamında sosyal etkileşim; bireylerin ortak mekânlarda karşılaşmaları, iletişim kurmaları, birbirlerini gözlemlemeleri ve sosyal ilişkiler geliştirmeleri şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu süreç, toplumsal bütünleşmenin, aidiyet duygusunun ve kamusal yaşamın oluşmasında temel rol oynamaktadır (Gehl, 2011; Whyte, 1980; Giddens, 2013).

Kamusal alanlarda sosyal etkileşimin güçlendirilmesi; erişilebilir, güvenli, konforlu ve işlevsel kamusal mekânların oluşturulmasına bağlıdır. Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren kent kuramcıları ve kentsel tasarım araştırmacıları, başarılı kamusal alanların insanların bir araya gelmesini teşvik eden belirli mekânsal özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur (Jacobs, 1961; Whyte, 1980; Gehl, 2011; Project for Public Spaces, 2000). Bu süreçte peyzaj tasarımı önemli bir rol üstlenmektedir. Bu nedenle açık kamusal alanlarda sosyal etkileşimi güçlendirmek için peyzaj planlama ve tasarım süreçlerine entegre edilmesi, daha yaşanabilir, kapsayıcı, güvenli ve sosyal açıdan sürdürülebilir kentlerin oluşturulması açısından önemli bir gereklilik olarak kabul edilmektedir (Madanipour, 2003; Carmona, 2021; UN-Habitat, 2020).

Bu çalışmanın amacı, kamusal alanlarda sosyal etkileşimi açıklayan kuramsal yaklaşımları sistematik bir biçimde analiz ederek ortak tasarım ilkelerini ortaya koymak; bu ilkeler doğrultusunda sosyal etkileşimi destekleyen peyzaj tasarım parametrelerini belirlemek ve kullanıcı odaklı kamusal alanların planlanması, tasarlanması ve değerlendirilmesinde kullanılabilecek bütüncül, uygulanabilir ve kuramsal temellere dayalı bir kavramsal çerçeve geliştirmektir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, kamusal alanlarda sosyal etkileşimi güçlendiren peyzaj tasarım parametrelerini belirlemek amacıyla nitel araştırma yaklaşımı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın temel materyalini kamusal alan, sosyal etkileşim, çevresel psikoloji, kentsel tasarım ve peyzaj mimarlığı alanlarında yayımlanmış ulusal ve uluslararası bilimsel çalışmalar, kitaplar ve kuramsal yaklaşımlar oluşturmaktadır.

Araştırma yöntemi üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, kamusal alanlarda sosyal etkileşimi açıklayan temel kuramsal yaklaşımlar sistematik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda Hannah Arendt, Jürgen Habermas, Jane Jacobs, Jan Gehl, William H. Whyte, Ray Oldenburg, Edward Hall, Roger Ulrich, Rachel ve Stephen Kaplan, Kevin Lynch, Christian Norberg-Schulz, Setha Low, Oscar Newman, Timothy Crowe ve diğer ilgili araştırmacıların çalışmaları değerlendirilmiştir. Ayrıca çevresel psikoloji, üçüncü mekân kuramı, biyofilik tasarım, CPTED (Crime Prevention Through Environmental Design), evrensel tasarım ve taktiksel kentleşme yaklaşımları araştırmanın kuramsal altyapısını oluşturmuştur.

İkinci aşamada, literatürden elde edilen veriler içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiş ve farklı kuramsal yaklaşımlarda ortak olarak vurgulanan tasarım bileşenleri belirlenmiştir. Benzer özellikler gösteren kavramlar bir araya getirilerek tematik kodlama yapılmış, bu kodlar doğrultusunda sosyal etkileşimi destekleyen temel peyzaj tasarım parametreleri oluşturulmuştur. Analiz sonucunda erişilebilirlik ve kapsayıcılık, konfor ve insan ölçeği, güvenlik ve doğal gözetim, sosyal canlılık ve işlevsellik ile estetik kalite ve yerel kimlik olmak üzere beş ana tasarım parametresi belirlenmiştir.

Üçüncü aşamada ise belirlenen ana parametreler, literatürde önerilen tasarım ilkeleri ve mekânsal gereklilikler doğrultusunda alt tasarım ölçütlerine dönüştürülmüştür. Böylece kuramsal yaklaşımlardan elde edilen bilgiler sentezlenerek, kullanıcı odaklı kamusal alanların planlanması, tasarlanması ve değerlendirilmesinde kullanılabilecek bütüncül bir kavramsal çerçeve geliştirilmiştir. Oluşturulan bu çerçeve, peyzaj mimarlığı ve kentsel tasarım disiplinlerinde uygulanabilecek tasarım ölçütlerini sistematik bir yapı altında sunmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Kamusal alanlarda sosyal etkileşimi açıklayan temel kuramsal yaklaşımlar sistematik literatür taraması yöntemiyle incelenmiştir. Bu kapsamda kamusal alan, sosyal etkileşim, çevresel psikoloji, insan odaklı kentsel tasarım ve peyzaj mimarlığı alanlarında öne çıkan kuramlar değerlendirilmiştir. Literatür incelemesi kapsamında ele alınan kuramsal yaklaşımlar, kamusal alanlarda sosyal etkileşimi etkileyen temel mekânsal bileşenlerin belirlenmesi amacıyla analiz edilmiş ve araştırmanın kuramsal altyapısını oluşturmuştur. Bu doğrultuda incelenen kuramcılar ve yaklaşımlar sırasıyla ele alınmıştır.

Kamusal Alanlarda Sosyal Etkileşimi Önemini Vurgulayan Kuramsal Yaklaşımlar ve Literatür Taraması

Felsefi Kökenler: Arendt ve Habermas

Kamusal alanın felsefi temelleri incelendiğinde, iki temel figür olarak Hannah Arendt ve Jürgen Habermas öne çıkar. Arendt (1958), kamusal alanı ortak dünya (common world) ve 'görünme alanı' (space of appearance) olarak tanımlar; ona göre bu alan, bireylerin kendi benzersizliklerini eylem ve söylem yoluyla başkalarına gösterdikleri sahneyi oluşturmaktadır. Arendt'in yaklaşımında kamusal alanın fiziksel ve mekânsal varlığı, eylemin gerçekleşmesi için zorunlu bir koşul olarak belirir.

Jürgen Habermas (1989) ise kamusal alanı daha çok iletişimsel eylem ve kamusal küre (public sphere) üzerinden söylemsel bir yapı olarak kurgular. Habermas'a göre bu alan, özel kişilerin bir araya gelerek toplumun genelini ilgilendiren sorunları tartıştığı ve rasyonel-eleştirel bir kamuoyunun olduğu tartışma zeminidir. Her iki kuramcı da kamusal alanın hiyerarşiden arındırılmış, eşitlikçi ve kapsayıcı bir karakterde olması gerektiği konusunda hemfikirdir; ancak Arendt'in eylem odaklı yaklaşımı kentsel tasarım ve peyzaj mimarlığı için daha doğrudan fiziksel çıkarımlar sunmaktadır.

Üçüncü Mekân Kuramı

Sosyolog Ray Oldenburg (1989), kamusal alanın sosyal önemini Üçüncü Mekân (Third Place) kavramıyla açıklar. Birinci mekân olan ev mahremiyeti ile ikinci mekân olan iş ortamının ötesinde üçüncü mekânlar, bireyin gönüllü, gayriresmî ve hiyerarşiden uzak biçimde sosyalleştiği alanlardır.

Çevresel Psikoloji ve Restoratif Etki

Roger Ulrich'in (1984) Stres Azaltma Kuramı (SRT) ile Rachel ve Stephen Kaplan'ın (1989) Dikkat Yenileme Kuramı (ART), doğa temelli kamusal alanların insan psikolojisi üzerindeki olumlu etkilerini ampirik olarak ortaya koymuştur. Yeşil alanlar, su öğeleri ve biyofilik unsurlar zahmetsiz dikkat (soft fascination) sunarak zihinsel yenilenmeye olanak tanır; stresi azalmış ve dikkati yenilenen bir birey, çevresiyle ve yabancılarla iletişim kurmaya daha açık bir tutum sergilemeye yatkındır.

Jan Gehl: Binalar Arasındaki Yaşam

Jan Gehl (2011), kamusal alanlardaki dış mekân aktivitelerini üç kategoriye ayırır: zorunlu aktiviteler, isteğe bağlı aktiviteler ve sosyal aktiviteler. Bu tipoloji, tasarım kalitesinin hangi eylem türleri üzerinde etkili olduğunu açıklaması bakımından belirleyici bir analitik araç sunmaktadır. Gehl'e göre kaliteli bir fiziksel çevre, isteğe bağlı aktivitelerin sıklığını artırarak sosyal aktivitelerin 'tohumlarını' eker; zira insanlar ancak oturmak, dinlenmek ve seyretmek için zaman harcadığında tesadüfi sosyal temaslar kendiliğinden ortaya çıkmaktadır.

Gehl'in tasarım felsefesi toplamak, bütünleştirmek, davet etmek ve dağıtmak ilkelerine dayanır. Bu ilkeler özellikle Kopenhag'ın kamusal alan yenileme projesinde somutlaşmış; araç trafiğine kapatılan Strøget caddesi, Gehl'in izleme yöntemiyle değerlendirilen ve yayaların yüzde otuz beş oranında arttığı bir dönüşüm sürecine sahne olmuştur (Gehl & Gemzøe, 2004).

William H. Whyte: Küçük Kentsel Alanların Sosyal Yaşamı

William H. Whyte (1980), New York'ta yürüttüğü Street Life Project kapsamında meydanların başarı ya da başarısızlık nedenlerini zaman ayarlı kameralarla belgelemiştir. Bu çalışmadan elde edilen en güçlü bulgulardan biri 'triangülasyon' (üçgenleme) kavramıdır: İki yabancı arasında bir bağ kuran üçüncü bir nesne ya da olgu —sokak sanatçısı, heykel, su ögesi yabancıların birbirleriyle söze başlaması için birer 'buzkıran' işlevi görmektedir.

Whyte aynı çalışmada oturulabilirlik ile meydana insan yoğunluğu arasındaki ilişkiyi de sayısal olarak ortaya koymuştur: Oturma kapasitesi yüksek olan meydanlar, benzer büyüklükteki ancak oturma elemanı yetersiz alanlara kıyasla yaklaşık iki kat daha fazla ziyaretçi çekmektedir (Whyte, 1980). Bu bulgu, konforun sosyal yoğunluk üzerindeki doğrudan belirleyiciliğini kanıtlar niteliktedir.

Proksemik: Edward Hall'un Kişilerarası Mesafe Modeli

Edward Hall'un (1966) proksemik teorisi, mekân tasarımının sosyal ilişkileri nasıl fiziksel olarak yapılandırıldığını açıklamaktadır. Hall, insanlar arasındaki mesafeyi mahrem (0–45 cm), kişisel (45–120 cm), sosyal (1,2–3,6 m) ve kamusal (3,6 m ve üzeri) olmak üzere dört bölgeye ayırır. Peyzaj mimarları, oturma birimlerini yerleştirirken bu psikolojik tampon bölgeleri gözetmek durumundadır: Birbirine çok yakın ve yüz yüze konumlandırılmış banklar, yabancılar arasında mahremiyet ihlali hissi yaratarak alanın boş kalmasına yol açabilirken, doksan derecelik açıyla düzenlenmiş oturma grupları sosyal etkileşimi kolaylaştırmaktadır.

Sosyal Etkileşim Düzeyleri: Mehta ve Gehl

Mehta (2007) ve Gehl'in (1971) ortaklaştırdığı sınıflandırma şemasına göre kentsel mekândaki sosyal etkileşim üç düzeyde işlemektedir. Düşük yoğunluklu pasif temas (başkalarını izlemek, seslerini duymak ya da yalnızca aynı mekânda var olmak), sosyal etkileşimin en yaygın ve temel biçimini oluşturmaktadır. Tesadüfi karşılaşmalar düzeyinde kısa süreli selamlaşmalar ve bilgi alışverişleri gerçekleşirken, aktif katılım düzeyinde derinlemesine sosyal alışverişler ve önceden planlanmış grup eylemleri yer almaktadır.

Dijitalleşme ve Kamusal Alanda Dönüşüm

Günümüzde kamusal alanlar, bireyler fiziksel olarak orada bulunsun bile dikkatlerini akıllı telefon ekranlarına yöneltme eğilimi nedeniyle ciddi bir işlevsel dönüşüm geçirmektedir. Turkle (2015), bu durumu 'bağlı ama yalnız' (connected but lonely) paradoksu olarak tanımlar. Gehl Architects'in zaman serisi verileri, bir meydana vakit geçirme oranının 1980' deki yüzde kırk üçten 2010'da yüzde yirmi altıya gerilediğini, ortalama yürüme hızının ise yüzde on beş arttığını ortaya koymaktadır; bu durum, kentsel alanların giderek 'hızlı geçiş koridorlarına' (thoroughfares) dönüştüğüne işaret etmektedir (Gehl & Svarre, 2013)

Kamusal Açık Alanlarda Sosyal Etkileşimi Güçlendiren Peyzaj Tasarım Parametreleri Kuramsal Yaklaşımları

Bu kuramsal yaklaşımlar ve literatür taraması doğrultusunda her ne kadar kuramcılar sosyal etkileşimi farklı perspektiflerden ele alsalar da erişilebilirlik, kapsayıcılık, konfor, güvenlik, sosyal canlılık ve mekânsal kimlik gibi ortak temaların öne çıktığı belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında söz konusu ortak temalar, kuramsal çerçevenin sistematik biçimde değerlendirilmesini sağlamak amacıyla beş temel başlık altında ele alınmıştır (Tablo 1). Bu doğrultuda kuramcılar görüşleri; erişilebilirlik ve kapsayıcılık, konfor ve insan ölçeği, güvenlik ve gözetim, işlevsellik ve sosyal canlılık ile estetik kalite ve yerel kimlik parametreleri oluşturulmuştur.

Tablo 1. Kamusal Açık Alanlarda Sosyal Etkileşimi Güçlendiren Beş Temel Peyzaj Tasarım Parametreleri

Kamusal Açık Alanlarda Sosyal Etkileşimi Güçlendiren Peyzaj Tasarım Parametreleri
• Erişilebilirlik ve Kapsayıcılık
• Konfor ve İnsan Ölçeği
• Güvenlik ve Gözetim
• Sosyal Canlılık ve İşlevsellik
• Estetik kalite ve Yerel Kimlik

Erişilebilirlik ve Kapsayıcılık Kuramsal Yaklaşımları

Kamusal alanların temel özelliği, toplumun tüm kesimleri tarafından erişilebilir, kapsayıcı ve eşit biçimde kullanılabilmesidir. Bu nedenle sosyal etkileşimin gerçekleşebilmesi için kullanıcıların mekâna kolaylıkla erişebilmesi ve kendilerini o mekânın bir parçası olarak hissedebilmesi gerekmektedir (Madanipour, 2003; Carmona vd., 2021; Steinfeld & Maisel, 2012).

Erişilebilirlik, sosyal etkileşimin ön koşuludur. Eğer farklı toplumsal gruplar bir alana fiziksel ya da psikolojik olarak giremiyorsa, etkileşimden söz edilemez. Americans with Disabilities Act (ADA) standartları gibi yasal çerçeveler, engelliler, yaşlılar ve çocuklar için rampalı geçişler ve uygun yüzey kaplamalarını zorunlu kılmaktadır (Steinfeld & Maisel, 2012). Görsel ve psikolojik erişilebilirlik boyutunda ise sınırların şeffaf tutulması dışarıdaki bireylerin içerideki aktiviteyi görebilmesi (open sightlines) davetkar bir alan kimliği oluşturmaktadır.

Sosyal kapsayıcılık açısından kritik bir boyut, alanın belirli bir gelir grubuna ya da ticari işletmeye hizmet etmemesidir. Setha Low (2000), kamusal alanların özelleşmesinin güvenlik politikalarını ön plana çıkardığını ve bu sürecin dezavantajlı grupları dışlayan mekânsal kontrol mekanizmalarını güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu kuramsal yaklaşımlar doğrultusunda erişilebilirlik ve kapsayıcılık parametresini oluşturan temel tasarım ölçütleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Erişilebilirlik ve Kapsayıcılık Parametresi Kuramsal Yaklaşımları

Kuramsal Yaklaşımlar	Temel Kuramsal Dayanak
Kamusal alanlarda evrensel tasarım ilkelerinin uygulanması sosyal etkileşimi artırır.	Kamusal eşit görünürlük (Arendt, 1958), Kamusal katılım (Habermas, 1989)
Engellilere yönelik rampalı geçiş ve dokunsal yüzeyler, alanın kullanıcı çeşitliliğini doğrudan artırır.	(Crowe, 2000), (Gehl, 2011)
Alanın çevresiyle görsel sürekliliği (açık sightlines), psikolojik erişilebilirliği güçlendirir.	İmageability (Lynch, 1960), (Gehl, 2011), Street eyes (Jacobs, 1961)
Farklı gelir gruplarından kullanıcıların aynı alanda buluşabilmesi, sosyal kapsayıcılığın temel göstergesidir.	Social mix (Jacobs, 1961), (Habermas, 1989)
Çok dilli ve çok kültürlü yönlendirmeler kapsayıcı alan kimliğini destekler.	Mekânın sosyal üretimi (Lefebvre, 1991), Kentsel çeşitlilik (Madanipour, 1996)

Konfor ve İnsan Ölçeği Kuramsal Yaklaşımları

Kamusal alanların sosyal etkileşim üretebilmesi için kullanıcıların kendilerini rahat, güvende ve mekâna ait hissetmeleri gerekmektedir. İnsan ölçeğini esas alan tasarım anlayışı; uygun mekânsal boyutlar, iklimsel konfor, ergonomik donatı elemanları ve duysal kaliteyi destekleyen peyzaj bileşenleri aracılığıyla kullanıcı deneyimini iyileştirmekte ve kamusal alanda kalma süresini artırmaktadır. Böylece kamusal alanlar yalnızca geçiş koridorları olmaktan çıkarak bireylerin dinlendiği, karşılaştığı ve sosyal ilişkiler geliştirdiği yaşam mekânlarına dönüşmektedir (Gehl, 2011; Whyte, 1980; Mehta, 2007).

Konfor, bir bireyin mekânda kalış süresini (lingering time) doğrudan belirler. Vakit geçirme süresi uzadıkça sosyal etkileşim ihtimali de istatistiksel olarak artar (Whyte, 1980). İklimsel konfor kapsamında güneşe erişim, rüzgar koruması ve bitkisel gölgelemenin birlikte tasarlanması; oturma konforu bağlamında ise yalnızca bankların değil, duvar kenarları, basamaklar ve saksı kenarlarının da 'rastlantısal oturma' (incidental seating) için tasarlanması beklenmektedir.

Duysal konfor da göz ardı edilemeyecek bir boyutu oluşturmaktadır. Trafik gürültüsünü maskeleyen su sesleri, hoş kokulu bitkiler ve göz hizasındaki detay zenginliği, mekânın insan ölçeğiyle uyumunu pekiştirmektedir. Gehl (2011), insan ölçeğinin yüz ifadelerinin seçilebileceği, yani 5 metre mesafenin temel tasarım birimi olarak ele alınması gerektiğini vurgular. Bu kuramsal yaklaşımlar doğrultusunda konfor ve insan ölçeği parametresini oluşturan temel tasarım ölçütleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Konfor ve İnsan Ölçeği Parametresi Kuramsal Yaklaşımları

Kuramsal Yaklaşımlar	Temel Kuramsal Dayanak
Oturma olanaklarının niceliği ve kalitesi, bir kamusal alanda geçirilen süreyi belirler.	Stay behavior (Whyte, 1980), Optional activities (Gehl, 2011)
Hareketli (mobil) oturma elemanları, bireylerin sosyal mesafeyi kendilerinin ayarlamasını sağlar.	(Whyte, 1980), Proxemics (Hall,1966)
İklimsel konfor sağlayan bitkisel gölgeleme ve rüzgar kıranlar, kalış süresini uzatarak sosyal teması artırır.	Olgay (bioclimatic design), (Gehl, 2011)
Duvar kenarları, basamaklar ve saksı kenarları 'rastlantısal oturma' için tasarlanmalıdır.	Edge effect (Whyte, 1980), Soft edges (Gehl, 2011)
İnsan ölçeğindeki (0-5 m) detay zenginliği, mekânda yavaşlamayı ve gözlemlemeyi teşvik eder.	Human scale (Gehl, 2011), Pattern language (Alexander,1977)

Güvenlik ve Gözetim Kuramsal Yaklaşımları

Kamusal alanlarda sosyal etkileşimin gerçekleşebilmesi için kullanıcıların kendilerini fiziksel ve psikolojik açıdan güvende hissetmeleri gerekmektedir. Güvenlik algısını destekleyen doğal gözetim, aktif cepheler, yeterli aydınlatma ve açık görüş alanları gibi tasarım unsurları, kullanıcıların kamusal alanları günün farklı zamanlarında güvenle kullanmasına olanak tanımaktadır. Böylece kamusal mekânlar yalnızca geçiş alanları olmaktan çıkarak bireylerin vakit geçirdiği, karşılaştığı ve sosyal ilişkiler geliştirdiği güvenli yaşam çevrelerine dönüşmektedir. Bu nedenle güvenlik ve gözetim, sosyal etkileşimi destekleyen kamusal alanların planlanması ve tasarlanmasında temel peyzaj tasarım parametrelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Jacobs, 1961; Newman, 1972; Crowe, 2013).

Jane Jacobs (1961), sokağın gözleri metaforuyla güvenliğin yalnızca kameral sistemler veya polis varlığına değil, aktif sokak kenarlarına kafeler, dükkanlar, evler bağlı olduğunu ileri sürmüştür. Dolayısıyla gerçek güvenlikten ziyade algılanan güvenlik sosyal hayatı belirleyen etkidir.

CPTED (Crime Prevention Through Environmental Design Çevresel Tasarım Yoluyla Suç Önleme) ilkeleri, görüşü engelleyen yüksek çalılıkların temizlenmesi, karanlık köşelerin elimine edilmesi ve yüzeyleri dikey olarak da aydınlatan aydınlatma sistemlerinin benimsenmesini önermektedir (Crowe, 2000). Bu müdahaleler, yabancılar arasındaki tehdit algısını düşürerek pasif sosyal teması kolaylaştırmaktadır. Bu kuramsal yaklaşımlar doğrultusunda güvenlik ve gözetim parametresini oluşturan temel tasarım ölçütleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Güvenlik ve Gözetim Parametresi Kuramsal Yaklaşımları

Kuramsal Yaklaşımlar	Temel Kuramsal Dayanak
Algılanan güvenlik düzeyi, bireylerin kamusal alanda sosyalleşme eğilimini doğrudan etkiler.	Defensible space (Newman, 1972),
Sokağa bakan aktif cephe (kafe, dükkan, konut) doğal gözetimi artırarak güvenlik algısını güçlendirir.	Eyes on the Street (Jacobs, 1961), (Gehl, 2011)
Yüzeyleri dikey olarak da aydınlatan aydınlatma sistemleri, gece sosyal etkileşim olanaklarını artırır.	CPTED (Crowe, 2000), (Jacobs, 1961),
CPTED ilkeleri (görüş açıklığı, karanlık köşelerin eliminasyonu) kamusal alanda güvenlik algısını ve kullanım süresini artırır.	CPTED (Crowe, 2000), (Newman, 1972)
Kırık pencereler teorisi kapsamında bakımlı yüzeyler vandalizmi azaltarak aidiyet ve güveni güçlendirir, kamusal kullanım ve sosyal etkileşimi artırır	Broken Windows (Wilson & Kelling, 1982)

Sosyal Canlılık ve İşlevsellik Kuramsal Yaklaşımları

Kamusal alanların sosyal etkileşim üretme kapasitesi, kullanıcıların bir araya gelmesini sağlayan işlevsel çeşitlilik ve mekânsal olanaklarla yakından ilişkilidir. Farklı yaş gruplarına ve kullanıcı profillerine hitap eden etkinlik alanları, karma kullanımlar, sosyal odak noktaları ve esnek mekânsal düzenlemeler, kamusal alanların günün farklı zamanlarında aktif olarak kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Kullanım çeşitliliğinin artması, kullanıcılar arasında karşılaşma ve iletişim fırsatlarını çoğaltarak kamusal yaşamın sürekliliğini desteklemektedir (Jacobs, 1961; Whyte, 1980; Gehl, 2011; Oldenburg, 1999).

Whyte'in (1980), vurguladığı üçgenleme prensibine uygun olarak bir heykel, sokak müzisyeni ya da interaktif su oyunları, sosyal etkileşim için katalizör işlevi görür. Fonksiyonel çeşitlilik bağlamında çocuk oyun alanları, spor aletleri, okuma köşeleri ve yeme-içme ünitelerinin bir arada planlanması, farklı kullanıcı profillerini emekliler, öğrenciler, aileler aynı mekânda buluşturur.

Jacobs (1961) ise karma kullanımın karma işlev, karma yaş, karma gelir grubu bir alanı gün boyunca canlı tutmanın temel stratejisi olduğunu, bu durumun da tesadüfi karşılaşmaların sıklığını artırdığını göstermektedir. Esnek kullanım alanları ise konserler, açık hava pazarları ve geçici festivaller gibi programlanmış etkinlikler için dönüştürülebilen, ancak altyapıyla donatılmış boş mekânlara duyulan ihtiyacı karşılar. Bu kuramsal yaklaşımlar doğrultusunda sosyal canlılık ve işlevsellik parametresini oluşturan temel tasarım ölçütleri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Sosyal Canlılık ve İşlevsellik Parametresi Kuramsal Yaklaşımları

Kuramsal Yaklaşım	Temel Kuramsal Dayanak
Fonksiyonel çeşitlilik ve etkinlik programlaması, alanın sosyal canlılığını doğrudan belirler.	Mixed-use diversity (Jacobs, 1961), (Gehl, 2011)
Üçgelenme işlevi gören heykel, su ögesi veya sokak sanatçısı, yabancılar arasında konuşma başlatır.	Triangulation (Whyte, 1980), (Lefebvre, 1991)
Bir arada konumlandırılan farklı aktivite alanları kuşaklararası sosyal teması destekler.	(Jacobs, 1961), Third place (Oldenburg, 1989)
Esnek zemin alanları (festival, pazar, gösteri için) alanı canlı ve dinamik tutar.	Tactical Urbanism (Lydon & Garcia, 2015), (Gehl, 2011)
Farklı saatlerin değişen kullanıcı ritimlerine yanıt veren zaman odaklı aktivite programları, kamusal alanların gün boyu aktif ve sosyal açıdan dinamik kalmasını sağlar.	(Jacobs, 1961), (Gehl, 2011), (Carmona vd., 2021)

Estetik Kalite ve Yerel Kimlik Kuramsal Yaklaşımları

Kamusal alanların kullanıcılar tarafından benimsenmesi, yalnızca işlevsel özelliklerine değil, aynı zamanda estetik niteliği ve yerel kimliği yansıtmasına da bağlıdır. Yerel kültürel ve doğal değerleri tasarıma yansıtan, estetik açıdan nitelikli kamusal alanlar kullanıcıların mekânla duygusal bağ kurmasını destekleyerek aidiyet duygusunu güçlendirmektedir. Bu nedenle estetik kalite ve yerel kimlik, kamusal alanların özgün karakterini koruyan ve sosyal etkileşimi destekleyen temel peyzaj tasarım parametrelerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Lynch, 1960; Norberg-Schulz, 1980; Relph, 1976).

Mekânın estetik kalitesi, bireyin o alana ait olma duygusunu (place attachment) pekiştirir. Özgün bir karakteri olan alanlar, kullanıcılar tarafından daha çok sahiplenilir ve korunur (Lewicka, 2011). Biyofilik tasarım ilkeleri doğrultusunda doğal malzemelerin (taş, ahşap) ve su öğelerinin kullanımı, insanların doğayla olan içgüdüsel bağını harekete geçirerek stresi azaltmaktadır (Kellert vd., 2008).

Kültürel referanslar boyutunda yerel sanatsal öğelerin ya da tarihi dokuların tasarıma entegre edilmesi, kolektif hafızayı güçlendirir. Taktiksel kentleşme yaklaşımı ise pop-up parklar, sokak boyamaları ve geçici oturma düzenlemeleri gibi küçük ölçekli müdahalelerle mekânın sürekli yenilenmesini sağlayarak toplumun alanla kurduğu aktif diyalogu canlı tutar (Lydon & Garcia, 2015). Bu kuramsal yaklaşımlar doğrultusunda estetik kalite ve yerel kimlik parametresini oluşturan temel tasarım ölçütleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Estetik Kalite ve Yerel Kimlik Parametresi Kuramsal Yaklaşımları

Kuramsal Yaklaşım	Temel Kuramsal Dayanak
• Sanatsal müdahaleler ve kentsel duvar resimleri, fotoğraf çekme davranışı üzerinden pasif sosyal etkileşimi tetikler.	• Spatial production (Lefebvre, 1991), Imageability (Lynch, 1960)
• Y Estetik özgünlük ve yerel kültürel kimlik kullanıcıların ait olma duygusunu pekiştirir.	• Genius loci (Norberg-Schulz, 1980), Place attachment (Tuan,1977)
• Biyofilik deneyim sunan doğal malzeme kullanımı insanların stres düzeyini azaltır.	• Biophilia (Kellert,2008), (Ulrich, 1984)
• Yerel tarihi ve kültürel sanat eserleri, kolektif hafızayı güçlendirerek alanda sahiplenme hissinin artırır.	• Collective memory (Rossi, 1982), (Halbwachs,1992)
• Standart kentsel mobilya kataloglarından bağımsız, bağlama özgü tasarım dili kimlik oluşturur.	• (Norberg-Schulz, 1980), Placelessness (Relph,1976)

Kamusal Açık Alanlarda Sosyal Etkileşimi Güçlendiren Peyzaj Tasarım Parametreleri

Bu araştırmada, içerik analizi sonucunda belirlenen ortak temalar bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiş ve kamusal alanlarda sosyal etkileşimi açıklayan kuramsal yaklaşımlar karşılaştırılarak ortak tasarım ilkeleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda erişilebilirlik ve kapsayıcılık, konfor ve insan ölçeği, güvenlik ve gözetim, sosyal canlılık ve işlevsellik ile estetik kalite ve yerel kimlik olmak üzere beş ana peyzaj tasarım parametresi oluşturulmuştur. Her bir ana parametre, literatürde öne çıkan mekânsal tasarım ilkeleri doğrultusunda alt tasarım ölçütleriyle desteklenmiş ve uygulamaya aktarılacak bütüncül bir tasarım rehberi geliştirilmiştir. Böylece kamusal alanlarda sosyal etkileşimi güçlendiren peyzaj tasarım parametreleri sistematik bir yapı altında bir araya getirilmiş; kuramsal yaklaşımlar arasındaki ortak noktaları sentezleyen ve peyzaj tasarımı sürecinde kullanılacak bir değerlendirme modeli ortaya konulmuştur. Oluşturulan ana parametreler ve bunlara ait alt tasarım ölçütleri Tablo 7'de sunulmaktadır.

Tablo 7. Kamusal Açık Alanlarda Sosyal Etkileşimi Güçlendiren Peyzaj Tasarım Parametreleri

Ana Kriter	Tasarımda Kullanılacak Alt Kriterler
Erişilebilirlik ve Kapsayıcılık	- Kamusal alana kesintisiz ve güvenli fiziksel erişim sağlanmalıdır. - Mekân evrensel tasarım ilkelerine uygun olarak düzenlenmelidir. - Her yaş ve farklı fiziksel yeterlilikteki kullanıcıların bağımsız kullanımına olanak tanınmalıdır. - Yönlendirme, bilgilendirme ve mekânsal okunabilirlik güçlendirilmelidir. - Toplu taşıma, yaya ve bisiklet ulaşımıyla güçlü bağlantılar kurulmalıdır. - Sosyal kapsayıcılığı destekleyen erişilebilir kamusal kullanım alanları oluşturulmalıdır.
Konfor ve İnsan Ölçeği	- Yeterli sayıda ve ergonomik oturma alanları sağlanmalıdır.2.2 Gölgeleme, rüzgâr kontrolü ve güneşlenme dengesiyle iklimsel konfor artırılmalıdır. - İnsan ölçeğine uygun mekânsal oranlar ve detaylar kullanılmalıdır. - Bitki, su ögesi, ses ve koku gibi duyuşsal peyzaj bileşenleri tasarıma entegre edilmelidir. - Esnek kullanımı destekleyen taşınabilir veya hareketli oturma elemanları sağlanmalıdır. - Kendiliğinden oluşan kısa süreli dinlenme ve buluşma noktaları desteklenmelidir.
Güvenlik ve Gözetim	- Doğal gözetimi artıran açık görüş alanları oluşturulmalıdır.3.2 Aktif cepheleer ile kamusal mekân arasında görsel ve işlevsel ilişki kurulmalıdır. - Yeterli ve homojen aydınlatma sağlanmalıdır. - Kör noktalar ve görüşü engelleyen fiziksel unsurlar azaltılmalıdır. - Düzenli bakım ve yönetim ile mekân kalitesi korunmalıdır. - Kullanıcı yoğunluğunu destekleyen tasarım kararlarıyla doğal sosyal denetim güçlendirilmelidir.
Sosyal Canlılık ve İşlevsellik	- Farklı kullanım senaryolarını destekleyen karma işlevler oluşturulmalıdır. - Sosyal etkileşimi teşvik eden odak noktaları tasarlanmalıdır. - Farklı yaş ve kullanıcı gruplarına hitap eden etkinlik alanları oluşturulmalıdır. - Esnek ve çok amaçlı kullanılabilecek açık mekânlar planlanmalıdır. - Günün farklı saatlerinde kullanılabilecek etkinlik ve program çeşitliliği sağlanmalıdır. - Geçici etkinliklere ve taktiksel kentleşme uygulamalarına uygun mekânsal esneklik sağlanmalıdır.

Geliştirilen tasarım rehberi, Carmona ve arkadaşlarının (2021) kamusal mekân kalitesine ilişkin çok boyutlu yaklaşımıyla örtüşmekte; Gehl'in (2010) insan odaklı tasarım ilkeleri, Jacobs'ın (1961) güvenlik ve sosyal yaşam yaklaşımı ile Whyte'in (1980) kullanıcı davranışlarına ilişkin değerlendirmelerini ortak bir sistem içerisinde bir araya getirmektedir. Bunun yanında biyofilik tasarım, evrensel tasarım, yerel kimlik ve taktiksel kentleşme gibi güncel tasarım yaklaşımlarının aynı değerlendirme çerçevesinde ele alınması, rehberin yalnızca yeni kamusal alanların planlanmasında değil, mevcut alanların analiz edilmesi, karşılaştırılması ve iyileştirilmesi süreçlerinde de kullanılabilecek esnek bir araç olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın en önemli katkısı, kamusal açık alanlarda sosyal etkileşimi destekleyen tasarım ilkelerini dağınık kuramsal bilgilerden çıkararak, uygulamaya aktarılabilecek sistematik bir peyzaj tasarım rehberi

hâline getirmesidir. Böylece tasarım kararlarının yalnızca estetik ya da işlevsel ölçütlerle değil, erişilebilirlik, kullanıcı deneyimi, güvenlik, sosyal etkileşim ve yerel kimlik gibi birbirini tamamlayan bileşenler çerçevesinde değerlendirilmesine olanak sağlanmaktadır.

Bununla birlikte geliştirilen rehber, kuramsal literatür sentezine dayanmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, önerilen parametrelerin farklı kamusal açık alanlarda uzman görüşleri, kullanıcı değerlendirmeleri ve saha uygulamalarıyla test edilmesi; kriterlerin önem düzeylerinin belirlenmesi ve farklı kent ölçeklerinde uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi, rehberin bilimsel geçerliliğini ve uygulama potansiyelini daha da güçlendirecektir.

4. Sonuç ve Öneriler

Kamusal alanlar, bireylerin yalnızca günlük gereksinimlerini karşıladıkları fiziksel mekânlar değil; aynı zamanda sosyal ilişkilerin kurulduğu, toplumsal etkileşimin geliştiği, kent kimliğinin üretildiği ve kullanıcıların aidiyet duygusu geliştirdiği temel yaşam alanlarıdır. Ancak günümüzde hızlı kentleşme, artan araç odaklı planlama anlayışı, kamusal alanların ticarileşmesi ve dijital yaşam biçimlerinin yaygınlaşması, kamusal mekânların sosyal etkileşim üretme kapasitesini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu nedenle kamusal alanların yalnızca fiziksel standartlar doğrultusunda değil, kullanıcı davranışlarını ve sosyal yaşamı destekleyen bütüncül tasarım ilkeleri doğrultusunda ele alınması gerekmektedir.

Bu araştırmada, kamusal alanlarda sosyal etkileşimi açıklayan kuramsal yaklaşımlar sistematik olarak incelenmiş, farklı disiplinlerden elde edilen bilgiler içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiş ve ortak tasarım ilkeleri belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda sosyal etkileşimi destekleyen tasarım bileşenlerinin erişilebilirlik ve kapsayıcılık, konfor ve insan ölçeği, güvenlik ve gözetim, sosyal canlılık ve işlevsellik ile estetik kalite ve yerel kimlik olmak üzere beş temel peyzaj tasarım parametresi altında toplandığı ortaya konulmuştur.

Belirlenen her bir parametre, farklı kuramsal yaklaşımlar tarafından vurgulanan mekânsal özellikleri bütüncül bir sistem içerisinde bir araya getirmektedir. Erişilebilirlik ve kapsayıcılık, kamusal alanların toplumun tüm kesimleri tarafından eşit biçimde kullanılabilmesini sağlarken; konfor ve insan ölçeği kullanıcıların mekânda kalma süresini ve deneyim kalitesini artırmaktadır. Güvenlik ve doğal gözetim, kamusal alanların günün farklı zamanlarında güvenle kullanılmasına katkı sağlarken; sosyal canlılık ve işlevsellik farklı kullanıcı grupları arasında karşılaşmaları ve sosyal etkileşimi teşvik etmektedir. Estetik kalite ve yerel kimlik ise kullanıcıların mekânla duygusal bağ kurmasını sağlayarak aidiyet duygusunu güçlendirmekte ve kamusal alanların özgün karakterinin korunmasına katkıda bulunmaktadır.

Araştırmanın önemli çıktılarından biri, literatürde çoğunlukla birbirinden bağımsız olarak ele alınan kuramsal yaklaşımların ortak bir değerlendirme sistemi altında bütünleştirilmiş olmasıdır. Böylece kamusal alanlarda sosyal etkileşimi etkileyen tasarım bileşenleri yalnızca kavramsal olarak açıklanmamış, aynı zamanda planlama ve tasarım süreçlerinde doğrudan kullanılacak alt tasarım ölçütleriyle desteklenen sistematik bir peyzaj tasarım çerçevesine dönüştürülmüştür. Bu yönüyle çalışma, mevcut literatürde yer alan farklı kuramsal yaklaşımlar arasında bütünleştirici bir bağ kurarak peyzaj mimarlığı ve kentsel tasarım disiplinlerine kavramsal bir katkı sunmaktadır.

Geliştirilen tasarım çerçevesinin; yeni kamusal alanların planlanması ve tasarlanmasında, mevcut kamusal alanların kullanıcı odaklı değerlendirilmesinde, tasarım kararlarının karşılaştırılmasında ve kamusal mekân kalitesinin artırılmasına yönelik çalışmalarda yol gösterici bir değerlendirme aracı olarak kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. Aynı zamanda bu parametreler, yerel yönetimler, tasarımcılar, şehir plancıları ve peyzaj mimarları için karar verme süreçlerini destekleyen ortak bir referans çerçevesi sunmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, kamusal alanlarda sosyal etkileşimi destekleyen kuramsal yaklaşımları bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirerek, beş temel peyzaj tasarım parametresi ve bunlara bağlı alt ölçütlerden oluşan sistematik bir kavramsal çerçeve ortaya koymuştur. Geliştirilen bu çerçevenin, kullanıcı odaklı, kapsayıcı, güvenli, yaşanabilir ve kimlikli kamusal alanların oluşturulmasına katkı sağlayacak bilimsel bir referans niteliği taşıdığı ve gelecekte gerçekleştirilecek akademik çalışmalar ile uygulama projeleri için önemli bir temel oluşturacağı değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

Alexander, C. (1977). *A pattern language: Towns, buildings, construction*. Oxford University Press.
Arendt, H. (1958). *The human condition*. University of Chicago Press.

- Carr, S., Francis, M., Rivlin, L. G., & Stone, A. M. (1992). *Public space*. Cambridge University Press.
- Carmona, M. (2021). *Public places, urban spaces: The dimensions of urban design* (3rd ed.). Routledge.
- Carmona, M., Heath, T., Oc, T., & Tiesdell, S. (2010). *Public places, urban spaces: The dimensions of urban design* (2nd ed.). Architectural Press.
- Crowe, T. D. (2000). *Crime prevention through environmental design: Applications of architectural design and space management concepts* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Gehl, J. (2011). *Life between buildings: Using public space* (6th ed.). Island Press.
- Gehl, J., & Gemzøe, L. (2004). *Public spaces, public life*. Danish Architectural Press.
- Gehl, J., & Svarre, B. (2013). *How to study public life*. Island Press.
- Giddens, A. (2013). *Sociology* (7th ed.). Polity Press.
- Habermas, J. (1989). *The structural transformation of the public sphere: An inquiry into a category of bourgeois society*. MIT Press.
- Halbwachs, M. (1992). *On collective memory*. University of Chicago Press.
- Hall, E. T. (1966). *The hidden dimension*. Anchor Books.
- Jacobs, J. (1961). *The death and life of great American cities*. Random House.
- Kaplan, R., & Kaplan, S. (1989). *The experience of nature: A psychological perspective*. Cambridge University Press.
- Kellert, S. R., Heerwagen, J. H., & Mador, M. L. (2008). *Biophilic design: The theory, science and practice of bringing buildings to life*. John Wiley & Sons.
- Lefebvre, H. (1991). *The production of space*. Blackwell.
- Lewicka, M. (2011). Place attachment: How far have we come in the last 40 years? *Journal of Environmental Psychology*, 31(3), 207–230.
- Low, S. M. (2000). *On the plaza: The politics of public space and culture*. University of Texas Press.
- Lydon, M., & Garcia, A. (2015). *Tactical urbanism: Short-term action for long-term change*. Island Press.
- Lynch, K. (1960). *The image of the city*. MIT Press.
- Madanipour, A. (1996). *Design of urban space: An inquiry into a socio-spatial process*. John Wiley & Sons.
- Madanipour, A. (2003). *Public and private spaces of the city*. Routledge.
- Mehta, V. (2007). *A toolkit for performance measures of public space*. Proceedings of the 43rd ISOCARP Congress, Antwerp, Belgium, 1–9.
- Montgomery, J. (1998). Making a city: Urbanity, vitality and urban design. *Journal of Urban Design*, 3(1), 93–116.
- Newman, O. (1972). *Defensible space: Crime prevention through urban design*. Macmillan.
- Norberg-Schulz, C. (1980). *Genius loci: Towards a phenomenology of architecture*. Rizzoli.
- Oldenburg, R. (1989). *The great good place*. Da Capo Press.
- Olgyay, V. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press.
- Project for Public Spaces. (2000). *How to turn a place around: A handbook for creating successful public spaces*.
- Putnam, R. D. (2000). *Bowling alone: The collapse and revival of American community*. Simon & Schuster.
- Relph, E. (1976). *Place and placelessness*. Pion.
- Rossi, A. (1982). *The architecture of the city*. MIT Press.
- Steinfeld, E., & Maisel, J. L. (2012). *Universal design: Creating inclusive environments*. John Wiley & Sons.
- Tuan, Y.-F. (1977). *Space and place: The perspective of experience*. University of Minnesota Press.
- Turkle, S. (2015). *Reclaiming conversation: The power of talk in a digital age*. Penguin Press.
- Ulrich, R. S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224(4647), 420–421. <https://doi.org/10.1126/science.6143402>
- UN-Habitat. (2020). *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*.
- Whyte, W. H. (1980). *The social life of small urban spaces*. Conservation Foundation.
- Wilson, J. Q., & Kelling, G. L. (1982). Broken windows: The police and neighborhood safety. *The Atlantic Monthly*, 249(3), 29–38.

**AN OVERVIEW OF THE APPLICATIONS OF CURRENT WIND-ASSISTED PROPULSION
TECHNOLOGY IN MODERN, ENERGY-EFFICIENT SHIPS**

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Üstün BAŞARAN

Izmir Katip Celebi University, Faculty of Naval Architecture and Maritime, Naval Architecture and
Marine Engineering Department, Izmir-Turkey

Email: hustun.basaran@ikcu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1491-0465>

Doç. Dr. Aytekin Duranay

Izmir Katip Celebi University, Faculty of Naval Architecture and Maritime, Naval Architecture and
Marine Engineering Department, Izmir-Turkey

Email: aytekin.duranay@ikcu.edu.tr

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9551-3508>

Abstract

The maritime industry is currently undergoing a significant transformation driven by decarbonization targets and environmental regulations established by the International Maritime Organization (IMO). Conventional marine propulsion systems primarily rely on diesel engines fueled by carbon-based fuels, making it challenging to achieve long-term sustainability goals. Consequently, alternative propulsion technologies are being investigated to improve fuel efficiency and reduce greenhouse gas emissions from ships. Among these technologies, wind-assisted propulsion (WAP) has emerged as a promising solution for enhancing the energy efficiency of marine vessels. This study presents a comprehensive review of the potential of WAP technologies for reducing fuel consumption and supporting the decarbonization of marine transportation. Recent studies investigating various WAP applications across different vessel types are critically examined. Particular attention is given to Flettner rotors, kite sails, and wing sails, which represent the most widely adopted WAP technologies. The advantages of these systems, including fuel savings and emission reductions, are discussed alongside their limitations, such as additional investment costs, operational constraints, and the need for route optimization. The reviewed literature demonstrates that WAP technologies have reached a relatively mature stage of development and have already been successfully implemented on several commercial vessels. Considering the growing number of planned installations and the potential reduction in technology costs through wider adoption, wind-assisted propulsion systems are expected to play an increasingly important role in supporting compliance with the IMO's decarbonization objectives and improving the sustainability of future marine transport.

Keywords: Wind-assisted propulsion, Energy efficiency, Decarbonization, Flettner rotors, Wing sails

1. Introduction

Currently, maritime transport has a significant role in the world. A considerable amount of goods is transported via ships and this trend is likely to continue in the following decades. However, most ships in use today are driven through marine diesel engines, marine gas turbines or with combination of those systems. Those power units require heavy fuel oil, marine diesel oil or marine gas oil to operate and provide steady thrust force for marine vessels and thus, cause high rates of CO₂, CO and NO_x into the environment (Ni et al., 2020). As seen in Figure 1 below, the NO_x limit for ships has been dramatically reduced since 2000 (Dieselnet, 2026).

Tier	Date	NO _x Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016†	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96

† In NO_x Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).

Figure 1. Evolution of NO_x limit for ships (Dieselnet, 2026)

Tier III applies for ships operating in emission control areas and as shown in Figure 1, is more stringent than Tier II. Currently, it is valid for a small percentage of shipping routes. Unlike Tier III, Tier II is less strict and can be met for marine vessels with relatively less technical difficulties, which is advantageous for ship owners. However, it is seen that even stricter emission norms will be issued for all ships in the future considering the environmental bodies' concern regarding emissions that threaten health (NO_x) and contribute to global warming (CO₂). Therefore, there is an ongoing research to develop new technologies to decrease and control the emission rates of ships (Sarbanha et al., 2023; Başaran, 2024).

Ships can be equipped with exhaust after-treatment systems to maintain the emission rates below a certain level (Zannis et al., 2022). Those systems are highly effective to curb emission rates. However, they are relatively costly, need periodical maintenance and effective operating temperature range to sufficiently improve emission rates (Basaran & Ozsoysal, 2017). Another main approach to mitigate the emission rates is to improve the energy efficiency of ships. There are several different techniques to improve energy efficiency of marine vessels. The design of ships is steadily improved to reduce the resistance and thus, lower fuel consumption. Moreover, more effective propellers are developed to increase the thrust force of ships and shipping routes are optimized to enhance energy efficiency of ships (Barreiro et al., 2022). Some advanced power systems such as waste heat recovery units, solar and fuel cell-assisted propulsion systems and use of hydrogen and methanol as alternative fuels are increasingly introduced and implemented to achieve energy-efficient ships (Başaran & Duranay, 2025; Ma et al., 2025). One other innovative technique for enhanced energy efficiency in ships is to apply wind-assisted propulsion (WAP) systems. Wind power can be converted to useful propulsion force through WAP units in marine vessels. It is free, renewable and at present, can be controlled reliably with innovative design of WAP systems to provide a considerable driving force for ships (Wang et al., 2025).

The objective of this study is to present the modern WAP technologies used in marine vessels. In the following section, at first, different types of WAP systems are introduced. Then, in the next section, advantages and challenges to implement those technologies in ships are explained. Finally, in the last section, the study is summarized with the emphasis of WAP systems having a significant role to meet strict emission regulations and energy efficiency requirements of ships in the future.

2. Classification of WAP systems

WAP can be defined as the utilization of wind power to support the driving force of all types of marine vessels. WAP systems can be used to provide additional thrust force (marine diesel engines still

supply the main thrust force) either in a large vessel such as a commercial tanker or a small vessel such as a fishing boat. Those systems are not expected to fully handle the vessel propulsion, but to provide a reliable and renewable auxiliary power for ships.

Currently, WAP technologies include four main categories: Flettner rotors, suction wings, wing sails and kite sails. Considering the ship type, different WAP methods are applied to harness wind power in an effective manner. Among those technologies, Flettner rotors technology is implemented in relatively large vessels such as tankers, bulk carriers and Ro-Ro vessels. As shown in Figure 2, this technology is applied (with 2 separate rotors) on a Ro-Ro (Roll-on/Roll-off) ship (Spliethoff Group, 2026).



Figure 2. Flettner rotors on a Ro-Ro vessel (Spliethoff Group, 2026)

This technology depends on the installation of spinning rotors onboard the ship, as two typical rotors are placed on the deck of the Ro-Ro ship in Figure 2. The rotors are maintained to rotate during ship operation. As the wind comes from the side of the ship, a low-pressure and a high-pressure region occurs at the front and back of the rotors, respectively, due to the different speed of air in those regions. Therefore, a thrust force is generated from the high-pressure region to low-pressure region and the ship is moved forward (De Marco et al., 2016). That extra propulsion force enables marine diesel engines to operate with lower loads and thus, consume lower heavy fuel oil or marine diesel oil during ship operation, which improves the total energy consumption and emission rates of the ship. The rotors are generally rotated with an electric motor or a diesel motor or a hydraulic motor, which at first seems to increase the total power need of the ship. However, the thrust power due to Flettner rotors is mostly much higher than the electric motor's power requirement and thus, total energy need of the vessel is successfully reduced (Seddiek & Ammar, 2021).

Another useful WAP system is the hard sails. This technology is also known as wing sails, as the sails installed on the vessels are mostly wing-shaped. Unlike soft sails, some high-strength, rigid sails are used to supply additional thrust force and reduce fuel use for the ship. (Lipman & Lidicker, 2019). Currently, carbon fiber, fiberglass or composite sails are preferred for the hard sails as those materials have improved strength-to-weight ratio, enhanced design flexibility and, unlike steel, are resistant to corrosion (CM Energy, 2026). As shown in Figure 3, four wing sails are placed on the deck of a tanker (The Maritime Executive, 2026).



Figure 3. Wing sails placed on a tanker (The Maritime Executive, 2026)

It is possible to automatically trim the rigid sails on a ship. Therefore, the angle of attack of the wind can be modulated to generate high- and low-pressure regions close to sails and ascertain a certain amount of thrust force for the ship. Unlike Flettner rotors, there is no rotation in the system and thus, mostly large sail areas are needed to yield high thrust force, which can be problematic for ships during arrival or departure from the ports or passing under a bridge.

In addition to Flettner rotors and hard sails, the suction wings can be used as an innovative WAP system to generate beneficial thrust force for ships. Suction wings are seen on the outside very similar to Flettner rotors. However, these systems have a different mechanism to produce thrust force on the ship. In Flettner rotors technique, the unit spins via an electric motor power, but there is not an external spin in suction wings. The rotation occurs inside this system, in a fan positioned at the top of the unit (actually two fans for each suction wings unit), as seen Figure 4 (Odfjell, 2026). Those fans are used to suck air from the flow surrounding the wings and cause a pressure difference and thus, an additional driving force for the ship.



Figure 4. Suction wings installed on a Tanker (Odfjell, 2026)

The last WAP system is the kite sails. A giant kite can be utilized at the bow of the ship to create thrust force and thus, assist the propulsion of the vessel. The forces created and acting on a marine vessel through kite sails are demonstrated in Figure 5 (Petković, M. et al., 2021). The wind power is first concentrated on the giant kite placed at a certain elevation above the ship. Then, it is channeled to the vessel through a rigid cable, which can be modulated through a control unit placed at the front of the ship. The kite can be maintained far from the vessel when there is strong wind to provide high propulsion

force or retracted into the deck to the control unit when high-speed wind is no longer available during operation. It does not need a significant space on the deck (it can be stored in a cargo-independent area) and thus, it does not cause any interference during cargo handling or cargo loading and unloading processes, which makes kite sailing more advantageous compared to other types of WAP. However, wind speed can rapidly increase at high altitudes, which can impair the control of kite and degrade the kite's effectiveness on generating useful thrust for the ship.

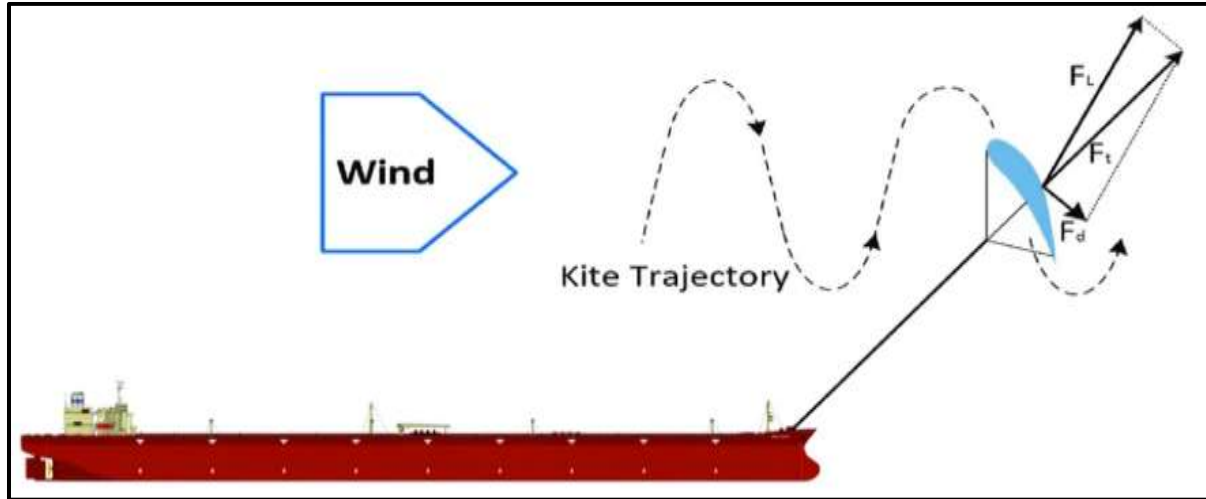


Figure 5. Forces acting on a ship via using kite sails (Petković, M. et al., 2021)

It is noted that current WAP systems are not sufficiently powerful to replace marine diesel engines, particularly in large commercial ships. They are installed to perform more like secondary power units. Wind speed and duration, shipping routes, ship speed and the installed technology considerably affect the potential of WAP units. Each technology has benefits, but also has challenges to cope with those aforementioned environmental and equipment-based conditions. In the next section, some of those advantages and challenges are explained.

3. Advantages and Challenges of WAP systems

The WAP technologies may differ, as mentioned in the previous section, considering the working principles and the particular installation requirements. While some of those techniques necessitate a constant rotation of the equipment to sustain a reliable thrust force, some techniques require the control of the equipment either at a certain elevation or at a certain distance from the ship to effectively harness the wind power. However, all of those innovative techniques are found to be effective, to a greater or lesser extent, at assisting ship propulsion and reduce the total fuel consumption of the ship (Wang et al., 2025).

In addition to improved energy efficiency, WAP technologies are cost-effective and helpful to meet IMO regulations. The benefits of WAP systems are summarized in Figure 6.

The CO₂ rates from ships are directly linked to the total fuel consumption during vessel operation. As in Figure 6, up to %30 fuel saving is seen to be possible with WAP systems in ships, which can also enable a reduction in CO₂ rates close to that percentage. Therefore, WAP systems can reduce the environmental footprint of shipping and help ship-owners operate their vessels in compliance with strict IMO regulations in the future. Moreover, considering the long vessel lifetime in service, total fuel cost for ships can be noticeably decreased as main propulsion systems consume lower heavy fuel oil or marine diesel oil as ships are increasingly equipped with WAP systems. In addition to improved fuel cost, noise and vibration levels can be mitigated in marine vessels since the primary power units can perform with relatively lower loads due to the wind power assistance of Flettner rotors or kite sails.

The WAP technologies have certain benefits for the ships. However, there are also some challenges that need to be overcome by researchers and ship-owners in order to improve the practicality of those systems in ships (Chou et al., 2021; Kolodziejewski & Sosnowski, 2025). Similar to advantages of WAP systems, the challenges are listed in Figure 7.

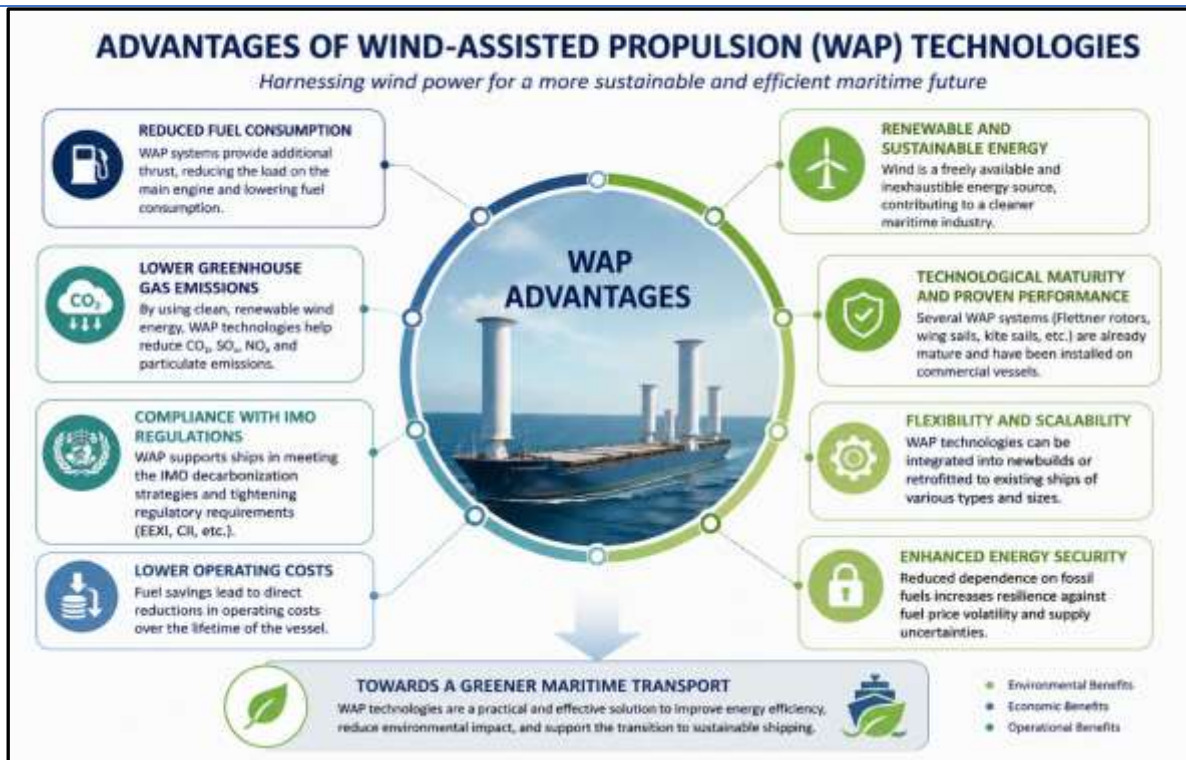


Figure 6. Advantages of WAP systems



Figure 7. Challenges of WAP systems

Currently, the initial investment for those systems is relatively high and in comparison to conventional solutions such as using alternative fuels to improve emission rates, they generally require longer payback period. However, in the long run, WAP can be a better solution for ships as wind is free and renewable, which is not valid for most of the conventional solutions. Another challenge for the WAP systems is the weather dependence of those units. The speed, direction and duration of the wind directly

affect the performance of WAP systems. The speed of the wind needs to be not too low to provide a considerable thrust force for the ship. It also needs to be not too high to damage those units or cause them to break down. An effective wind speed range, which is difficult to maintain during vessel voyage, is desirable to avoid those disadvantages. In addition, not every commercial ship has the proper route to maximize the wind power assistance (for instance, most passenger and car ferries have fixed routes). Therefore, shipping routes may need to be optimized to increase the effectiveness of WAP systems. Moreover, those systems are installed on the main deck of ships, which causes an interference for maximum cargo space on the ship. It can also be problematic for cargo loading/unloading processes and movement of the ships within the ports as WAP units have certain space on the deck and restrict the visibility around the ship. Some dynamic systems (such as moving on rails or foldable mechanisms) can be designed to avoid such drawbacks, which unfortunately rises the installation cost. Finally, WAP systems have several moving parts, particular control units (foldable hard sails may need special equipment to maintain the dynamic process and kite sails may need a reliable control mechanism to measure wind speed instantaneously to keep the kite in safe condition) and power systems (electric motors for Flettner rotors and fans for suction wings), which need periodical maintenance due to the harsh marine environment (wear and corrosion on the material).

4. Conclusion

This study presented an overview of the current wind-assisted propulsion (WAP) technologies used to improve the energy efficiency and environmental performance of modern ships. The four major WAP systems currently applied in maritime transportation—Flettner rotors, wing sails, suction wings, and kite sails—were reviewed with respect to their operating principles, practical applications, advantages, and limitations. The reviewed literature demonstrates that these technologies can provide considerable fuel savings and emission reductions when properly integrated with conventional marine propulsion systems.

Despite their promising potential, several technical and operational challenges remain, including relatively high initial investment costs, dependence on favorable weather conditions, route optimization requirements, deck space limitations, maintenance needs, and operational constraints during port operations. Consequently, the selection of an appropriate WAP technology should consider the vessel type, operational profile, trading route, and economic feasibility rather than relying solely on the maximum achievable fuel savings.

Overall, wind-assisted propulsion systems should be regarded as complementary technologies rather than replacements for conventional marine propulsion systems. Considering the continuous development of aerodynamic designs, automatic control systems, digital route optimization, and the increasing demand for low-carbon shipping, WAP technologies are expected to play an increasingly important role in supporting the IMO's decarbonization objectives and improving the sustainability of future maritime transportation.

Acknowledgment

This study is supported by Research Fund of the Izmir Katip Celebi University. Project Number: 2026-KDP-GİDF-0009.

References

- Barreiro, J., Zaragoza, S., & Diaz-Casas, V. (2022). Review of ship energy efficiency. *Ocean Engineering*, 257, 111594. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111594.
- Basaran, H. U., & Ozsoysal, O. A. (2017). Effects of application of variable valve timing on the exhaust gas temperature improvement in a low-loaded diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 122, 758-767. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.098.
- Başaran, H. Ü. (2024). An overview of the potential of alternative fuels in decarbonizing future shipping. In *Advances in Sustainable and Technological Maritime Solutions*. Duvar Yayınevi: Izmir, Turkey, 2024; pp. 17-38.
- Başaran, H. Ü., & Duranay, A. (2025). Advanced power systems to improve energy efficiency in modern vessels in operation: a review. In *Research, Technology and Innovation in Shipbuilding and Maritime*. Duvar Yayınevi: Izmir, Turkey, 2025; pp. 21-44.
- Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., & Renken, K. (2021). A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology. *Sustainability*, 13(4), 1880. DOI: 10.3390/su13041880.

- CM Energy. (2026). The Role of Rigid Wing Sails in Decarbonizing Shipping, Accessed on 12 July 2026, available online at: <https://www.cm-energy.com/knowledge/the-role-of-rigid-wing-sails-in-decarbonising-shipping>
- De Marco, A., Mancini, S., Pensa, C., Calise, G., & De Luca, F. (2016). Flettner rotor concept for marine applications: A systematic study. *International Journal of Rotating Machinery*, 2016(1), 3458750. DOI: 10.1155/2016/3458750.
- Dieselnet. (2026). MARPOL Annex VI NOx emission limits, Accessed on 11 July 2026, available online at: <http://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#nox>
- Kolodziejski, M., & Sosnowski, M. (2025). Review of wind-assisted propulsion systems in maritime transport. *Energies*, 18(4), 897. DOI: 10.3390/en18040897.
- Lipman, T. E., & Lidicker, J. (2019). Wind-assist marine demonstration for ferries: prospects for saving diesel fuel with wind power. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 22(1), 68-83. DOI: 10.1504/IJETM.2019.101353.
- Ma, R., Zhao, Q., Wang, K., Cao, J., Yang, C., & Huang, L. (2025). Energy efficiency improvement technologies for ship in operation: A comprehensive review. *Ocean Engineering*, 331, 121258. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121258.
- Ni, P., Wang, X., & Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions from marine diesel engines. *Fuel*, 279, 118477. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118477.
- Odfjell. (2026). Suction sails explained, Accessed on 12 July 2026, available online at: <https://www.odfjell.com/about/our-stories/suction-sails-explained-a-breakthrough-in-wind-propulsion-technology/>
- Petković, M., et al. (2021). Wind Assisted Ship Propulsion Technologies – Can they Help in Emission Reduction? *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo*, 68(2), 102-109. DOI: 10.17818/NM/2021/2.6.
- Sarbanha, A. A., Larachi, F., Taghavi, S. M., Thiboutot-Rioux, M., Boudreau, A., & Dugas, G. (2023). Mitigation of ship emissions: overview of recent trends. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(4), 1707-1724. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c03621.
- Seddiek, I. S., & Ammar, N. R. (2021). Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 32695-32707. DOI: 10.1007/s11356-021-12791-3.
- Spliethoff Group. (2026). Norsepower's Rotor sails solution on board Bore's mv Estraden, Accessed on 11 July 2026, available online at: <https://spliethoff-group.foleon.com/spliethoff-group-sustainability-report/spliethoff-group-sustainability-report-edition-1/norsepower-rotor-sail-onboard-mv-estraden>
- The Maritime Executive. (2026). VLCC New Aden with four rigid sails, Accessed on 12 July 2026, available online at: <https://maritime-executive.com/article/china-delivers-first-vlcc-equipped-with-four-rigid-sails>
- Wang, K., Li, Z., Liu, X., Hu, Z., Huang, L., Song, Q., Liang, H., Jiang, X. (2025). Wind-assisted propulsion system for shipping decarbonization: Technologies, applications and challenges. *Energy*, 138420. DOI: 10.1016/j.energy.2025.138420.
- Zannis, T. C., et al. (2022). Marine exhaust gas treatment systems for compliance with the IMO 2020 global sulfur cap and tier III NOx limits: a review. *Energies*, 15(10), 3638. DOI: 10.3390/en15103638.

**MICROWAVE-ASSISTED PHOTOCATALYST DESIGN: CRYSTAL-PHASE CONTROL,
DEFECT ENGINEERING, AND MORPHOLOGICAL REGULATION FOR ENHANCED
PHOTOCATALYTIC PERFORMANCE**

Araş. Gör. Kübra KÖŞE KAYA

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği
Bölümü Sivas-Türkiye

Email: kubra.kaya@sivas.edu.tr

Orcid: 0000-0001-9868-7442

Abstract

Photocatalytic performance is not determined solely by the chemical composition of a semiconductor. Crystal phase, crystallite size, surface area, porosity, defect density, surface-active sites, and charge-carrier recombination behavior are also important factors governing photocatalytic activity. Many of these characteristics are established during synthesis. Microwave-assisted synthesis can influence processes such as nucleation, crystal growth, and phase transformation through rapid and direct energy transfer. For this reason, it has attracted attention as a promising approach for tailoring the structural and electronic properties of photocatalysts. However, the effect of microwave processing is not identical for all materials. The resulting structure depends not only on microwave power and irradiation time but also on the dielectric behavior of the solvent, the nature of the precursors, pH, temperature, reactor geometry, sample volume, and stirring conditions. Variations in these parameters can lead to products with different degrees of crystallinity, morphologies, and defect structures. This review primarily focuses on TiO₂-based photocatalysts and evaluates the effects of microwave-assisted synthesis on phase formation, crystallite size, surface area, defect structure, and photocatalytic performance. Selected studies on Fe₂O₃ and layered double hydroxides are also discussed within a comparative framework. The effects of microwave power, treatment time, and temperature on the balance between nucleation and crystal growth are assessed using evidence from XRD, SEM/TEM, BET, UV–Vis DRS, PL, EPR, XPS, EIS, and photocurrent analyses. The literature indicates that high crystallinity alone does not necessarily lead to superior photocatalytic performance; controlled defects, accessible surface area, suitable phase composition, and effective heterointerfaces must be considered together. Microwave-assisted synthesis should therefore be regarded not only as a rapid preparation method but also as a materials-design strategy for controlling structure–property–performance relationships.

Keywords: Microwave-assisted synthesis, photocatalyst, crystallinity, defect engineering, morphology control, structure–property–performance relationship.

1. Introduction

Photocatalysis is regarded as an important approach in environmental and energy applications, including the conversion of solar energy into chemical energy, hydrogen production, carbon dioxide reduction, and the removal of organic pollutants (Guo et al., 2023; Sari et al., 2024). However, insufficient light absorption, rapid charge-carrier recombination, and limited surface redox efficiency in many semiconductor photocatalysts hinder their practical applications (Li and Wu, 2015; Corby et al., 2021).

Therefore, photocatalytic performance depends not only on the chemical composition of the material employed. Parameters such as crystal phase, crystallite size, surface area, pore structure, surface defects, and charge-carrier recombination behavior also play decisive roles in evaluating performance (Niu et al., 2020; Che et al., 2023). Particularly in TiO₂-based photocatalysts, performance cannot be adequately explained solely by crystallinity or particle size (Park et al., 2004; Dozzi et al., 2021). Although conventional hydrothermal and sol–gel methods enable the adjustment of material structure and morphology, they may exhibit limitations such as slow heating, long reaction times, and the formation of temperature gradients within the reaction medium because heating occurs externally through conduction and transport processes (Kunal et al., 2020; Poppi et al., 2022; De Conti et al., 2023). In contrast, microwave-assisted synthesis can provide rapid and volumetric heating through the direct interaction of electromagnetic energy with the reaction medium, thereby shortening the reaction time and enabling more effective control over nucleation and crystal-growth processes (Kunal et al., 2020; Li et al., 2024). Such control over nucleation and crystal growth directly influences the crystal structure, particle morphology, and surface properties of the material. These structural and surface characteristics, which vary depending on the synthesis conditions, collectively determine the light-absorption behavior of the material, the separation and transport of photogenerated charge carriers, and the formation of reactive species on the surface, thereby shaping photocatalytic performance (Kubiak et al., 2024; Lu et al., 2020). For example, in microwave-assisted in situ TiO₂ synthesis, increasing the treatment temperature has been reported to induce a transition from an amorphous structure to nanocrystalline anatase, while the accompanying changes in morphology and pore structure affect the specific surface area (Calatayud et al., 2014; Kubiak et al., 2024). At higher temperatures, a decrease in surface area has been observed as a result of more pronounced crystal growth (Kubiak and Cegłowski, 2024). Similarly, prolonging the microwave treatment time altered the surface morphology and exposed crystal facets of TiO₂ crystals, while the decrease in PL intensity was associated with lower electron–hole recombination (Kubiak et al., 2023).

Therefore, the fundamental question in photocatalyst development studies is not simply “which material was used?” The synthesis conditions under which the material was formed, the crystal phase it acquired, the surface defects it contained, and the manner in which these properties affected charge-carrier behavior should be evaluated together. In microwave-assisted in situ synthesized TiO₂ samples, the decrease in PL intensity and the improvement in photo-oxidation performance with increasing treatment time indicate that the synthesis conditions may affect carrier recombination and photocatalytic activity (Kubiak et al., 2023). Similarly, in microwave-prepared g-C₃N₄ samples, microwave power and irradiation time were reported to alter particle size, morphology, degree of crystallinity, and optical properties, and these changes were reflected in dye-removal performance under visible light (Plubphon et al., 2022).

In microwave-assisted synthesis, heat is generated within the reaction medium through the interaction of the electromagnetic field with polar molecules and mobile ions. The reorientation of polar molecules in response to the alternating electric field gives rise to dipolar polarization, whereas the movement of ions in solution results in heat generation through ionic conduction (Zhu and Chen, 2014; Becerra-Paniagua et al., 2022). This mode of energy transfer differs from the conduction and convection processes that dominate conventional heating, in which heat is transferred from the reactor wall toward the solution. Therefore, under microwave irradiation, temperature increase, precursor dissolution, nucleation, crystal growth, and phase transformation may proceed at different rates compared with conventional heating (Zhu and Chen, 2014).

Nevertheless, the structure of the product obtained by microwave synthesis cannot be explained solely by the applied power or treatment time. The dielectric properties of the solvent, the viscosity of the medium, the type and concentration of the precursors, pH, reactor geometry, filling volume, stirring

conditions, and actual temperature profile collectively determine the extent to which microwave energy is absorbed and distributed within the reaction medium (Becerra-Paniagua et al., 2022; Zhu and Chen, 2014).

Therefore, reporting only the nominal power is insufficient for the direct comparison of different microwave studies. Reaction temperature, heating rate, treatment time, sample volume, reactor type, and, where possible, the absorbed power per unit mass or energy density should also be reported (Chan et al., 2021).

Particularly under high-power conditions, even variations of a few seconds may cause considerable differences in reaction temperature, leading to variability in product structure and reproducibility problems (Chan et al., 2021). Similarly, in large-volume systems, limitations in electromagnetic-field penetration depth and non-uniform temperature distribution may increase the risk of local overheating, agglomeration, and structural differences among products (Martina et al., 2021; Xu et al., 2026). Therefore, the objective of microwave-assisted synthesis should not be limited to reaching high temperatures within a short time. The primary aim should be to regulate the microwave conditions in a manner that enables control over crystallinity, defect density, morphology, and surface area, and to verify these structural changes using appropriate characterization results (Zhu and Chen, 2014; Chan et al., 2021).

The effect of microwave treatment on photocatalysts does not occur in the same direction for every material class. In some systems, rapid nucleation may contribute to the formation of smaller crystallites and an increase in surface area, whereas high temperatures or prolonged treatment times may be associated with crystal growth, agglomeration, or a reduction in pore structure (Zhu and Chen, 2014; Becerra-Paniagua et al., 2022). Therefore, high microwave power or long treatment time should not be considered, by itself, an indicator of superior photocatalytic performance. In most cases, the appropriate processing conditions depend on the balance among crystallinity, defect structure, surface area, and morphology (Zhu and Chen, 2014; Martina et al., 2021).

This situation can be illustrated using different material systems. In TiO₂ systems, increasing the microwave treatment temperature has been reported to promote the transition from an amorphous structure to nanocrystalline anatase, whereas further increases in temperature may lead to a decrease in specific surface area because of crystal growth (Kubiak and Cegłowski, 2024). This finding suggests that higher crystallinity does not necessarily correspond to higher photocatalytic activity under all conditions and that crystal phase, porosity, and surface area should therefore be evaluated together (Kubiak and Cegłowski, 2024). Similarly, following the optimization of microwave parameters in a NiFe-LDH system, the optical band gap was reported to decrease from 3.35 to 3.04 eV, accompanied by an improvement in the transient photocurrent response (Niu et al., 2022). This result indicates that microwave conditions may influence the optical properties and charge-carrier behavior of certain LDH systems (Niu et al., 2022).

However, this trend should not be generalized to all materials because precursor chemistry, solvent-ion interactions, phase formation, and the dielectric properties of the material can substantially affect the synthesis outcome (Zhu and Chen, 2014; Martina et al., 2021). The aim of this review is not to evaluate microwave-assisted synthesis merely as a method for obtaining products within shorter periods. The effects of microwave power, treatment time, temperature, solvent, precursor concentration, pH, reactor geometry, and stirring conditions on crystallinity, phase control, defect density, morphology, porosity, and photocatalytic performance will be comparatively discussed. In this review, the reported results for TiO₂-, Fe₂O₃-, and layered double hydroxide-based systems will be comparatively evaluated using structural, optical, and charge-transport evidence obtained from XRD, SEM/TEM, BET, UV-Vis DRS, PL, EPR, XPS, EIS, and photocurrent analyses. In this way, the conditions under which microwave synthesis strengthens structure-property-performance relationships and those under which it may lead to excessive crystal growth, agglomeration, uncontrolled defect formation, or limited reproducibility will be identified.

2. Literature Selection and Evaluation Approach

Within the scope of this review, experimental and review studies related to microwave-assisted photocatalyst synthesis were examined. The studies were evaluated based on whether they reported synthesis parameters such as microwave power, temperature, treatment time, solvent, and precursor type, and whether they related these parameters to crystal phase, crystallite size, surface area, defect

structure, charge-carrier behavior, or photocatalytic performance. While TiO₂-based systems were addressed in detail, selected studies on Fe₂O₃ and layered double hydroxides were examined within a comparative framework. Photocatalytic degradation, adsorption, and electrocatalytic results were interpreted separately; results based solely on color removal or parent-compound removal were not considered equivalent to mineralization data.

a. Physical and Chemical Basis of Microwave-Assisted Synthesis

Microwave-assisted synthesis is a method that performs heating by utilizing the interaction of electromagnetic radiation with the reaction medium. Microwaves are located within the frequency range of approximately 0.3–300 GHz in the electromagnetic spectrum, whereas a frequency of 2.45 GHz is most commonly used in laboratory-scale microwave reactors (Zhu and Chen, 2014; Becerra-Paniagua et al., 2022). The energy of microwave photons at this frequency is not sufficient to directly break typical covalent bonds. Therefore, the primary effect in microwave-assisted synthesis is not direct bond cleavage, but heat generation through dielectric losses within the reaction medium (Zhu and Chen, 2014).

b. Dielectric Heating, Solvent Selection, and Energy Transfer

Heat generation under a microwave field is mainly associated with dipolar polarization and ionic conduction mechanisms. In dipolar polarization, polar molecules such as water, ethanol, or ethylene glycol attempt to reorient themselves in the direction of the alternating electric field. The inability of the molecules to fully follow the field variation contributes to the dissipation of energy as heat through rotational motion and intermolecular interactions (Zhu and Chen, 2014; Becerra-Paniagua et al., 2022).

In ionic conduction, ions present in the solution move according to the direction of the alternating electric field. The resistance and collisions occurring during this ionic motion may generate additional heat, particularly in solutions with a high ionic content (Becerra-Paniagua et al., 2022). The relative contribution of these two mechanisms may vary depending on the polarity of the solvent, ionic concentration, viscosity, temperature, and other components present in the reaction medium (Zhu and Chen, 2014).

c. Energy Transfer and Volumetric Heating

In conventional heating, energy is generally transferred from the heat source to the reactor wall and subsequently to the solution through conduction and convection. In microwave applications, however, energy can be directly converted into heat within the reaction medium by solvents, ions, or solid components capable of absorbing the electromagnetic field (Martina et al., 2021; Becerra-Paniagua et al., 2022). This feature has been associated with faster temperature increases and shorter processing times in certain systems (Zhu and Chen, 2014; Martina et al., 2021).

Nevertheless, microwave heating should not be assumed to be completely homogeneous under all conditions. Field distribution, reactor geometry, sample volume, stirring rate, dielectric properties of the material, and microwave penetration depth may affect the temperature distribution and the actual amount of energy absorbed by the sample (Chan et al., 2021; Zhu and Chen, 2014). In particular, the limited penetration depth in water and solvents exhibiting high dielectric loss is an important consideration for scale-up and temperature control in large-volume systems (Zhu and Chen, 2014).

Selective heating or localized energy concentration under microwave fields has been discussed in various studies. However, to reliably evaluate the contribution of such effects to the synthesis outcome, the temperature profile, energy density, and reactor conditions must be carefully controlled; otherwise, microwave effects cannot be distinguished from effects caused solely by temperature differences (Zhu and Chen, 2014; Martina et al., 2021).

d. Solvent Selection and Dielectric Loss Factor

In liquid-phase microwave-assisted syntheses, solvent selection may be decisive in determining energy absorption and the rate of temperature increase. The heating behavior of a solvent under a microwave field is generally expressed by the loss tangent:

$$\tan \delta = \frac{\delta''}{\delta'}$$

Here, δ' is the dielectric constant, whereas δ'' is the dielectric loss factor. The loss tangent is used as a useful parameter indicating the extent to which microwave energy transferred to the reaction medium can be converted into heat (Becerra-Paniagua et al., 2022; Zhu and Chen, 2014).

In microwave synthesis studies, solvents are generally classified as high-, medium-, and low-loss media. Ethylene glycol, which has a high loss tangent, has been reported to strongly absorb microwave energy, whereas water is regarded as a moderate microwave absorber at 2.45 GHz (Zhu and Chen, 2014). Zhu and Chen reported approximate values of $\tan\delta=0.123$ for water $\tan\delta=1.350$ for ethylene glycol (Zhu and Chen, 2014). In contrast, low-polarity solvents may interact more weakly with the microwave field, and their direct heating behavior may therefore remain limited (Zhu and Chen, 2014).

The dielectric properties of solvents do not remain constant with temperature. For example, the loss tangent of ethanol has been shown to decrease with increasing temperature, whereas the microwave absorption capacity of certain ionic liquids, in which ionic conduction is dominant, may increase with temperature (Zhu and Chen, 2014). Therefore, not only the initial solvent selection but also the temperature-dependent changes in dielectric properties throughout the reaction may influence microwave synthesis conditions (Zhu and Chen, 2014; Becerra-Paniagua et al., 2022).

3. Evaluation in Terms of Photocatalyst Synthesis

The importance of microwave-assisted synthesis for photocatalyst development is not limited to obtaining products within shorter periods. Since rapid heating, solvent-precursor interactions, and energy absorption can influence nucleation, crystal growth, phase formation, and morphology, materials with different surface areas, crystal structures, or defect densities can be obtained (Zhu and Chen, 2014; Becerra-Paniagua et al., 2022). However, this effect should not be expected to occur in the same direction for all material classes. Therefore, microwave power, duration, temperature, solvent, precursor concentration, pH, stirring conditions, and reactor design should be reported together in microwave synthesis studies (Chan et al., 2021; Martina et al., 2021).

Within this framework, microwave-assisted synthesis should be considered not only as a rapid heating method, but also as a materials-design approach with the potential to direct the crystallinity, defect structure, and morphology of photocatalysts (Zhu and Chen, 2014; Becerra-Paniagua et al., 2022).

4. Crystallinity and Phase Control

In microwave-assisted synthesis, the direct transfer of electromagnetic energy to polar molecules accelerates nucleation and crystal-growth processes, providing high crystallinity within much shorter periods than conventional methods (Jain et al., 2025; Lat,f et al., 2025; Liu et al., 2026). In this method, microwave radiation directly interacts with metal-organic precursors and facilitates the formation of the photocatalytically active anatase phase (Ao et al., 2022). Through newly developed in situ approaches, it has become possible to obtain crystalline TiO₂ nanoparticles even at temperatures below 100°C (Kubiak et al., 2024). In terms of phase control, the use of rutile seed crystals (RS) in microwave synthesis allows the anatase-rutile ratio to be precisely adjusted from 33% to 99.3% (Gong et al., 2025). While the addition of RS provides nucleation sites and lowers the phase-transition temperature, microwave-induced local “hot spots” accelerate atomic rearrangement and improve crystal quality (Gong et al., 2025).

In zinc oxide (ZnO) systems, microwave power plays a decisive role in the degree of crystallinity; for example, structures synthesized at 450 W exhibit higher XRD peak intensity and larger crystallite size than those synthesized at 600 W (Pawar et al., 2024). Excessive increases in microwave power may hinder the growth of ZnO crystals along the c-axis, corresponding to the (002) plane, thereby limiting the development of hierarchical morphologies (Pawar et al., 2024). Lower power levels, such as 450 W, generally result in larger crystallite size and lower microstrain, whereas excessively high power levels may increase crystal defects because of rapid and irregular nucleation (Pawar et al., 2024).

In graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) synthesis, increasing microwave power and irradiation time improve the atomic order of the material and provide a higher degree of crystallinity than the conventional furnace method (Plubphon et al., 2022). In iron oxides (Fe₂O₃), crystallinity is strongly dependent on the synthesis temperature; amorphous structures are obtained at 200–300°C, whereas temperatures of 400°C and above trigger the transition to the pure rhombohedral hematite phase (Silva et al., 2025). In some systems, high crystallinity may not always guarantee the best performance; in the case of BiFeO₃ (BFO), amorphous structures synthesized at 140°C were demonstrated to provide faster photocatalytic dye removal than forms crystallized at 750°C (Knuth et al., 2024). This behavior arises because atomic disorder and high porosity in amorphous structures may provide more efficient charge-carrier separation than the low surface area of crystalline forms (Knuth et al., 2024).

5. Defect Engineering and Surface Chemistry *Yusur Mühendisliği ve Yüzey Kimyası*

One of the most critical strategies determining photocatalyst performance in microwave-assisted synthesis processes is the formation of controlled defects in the crystal structure and the optimization of surface chemistry (Martina et al., 2021; Ao et al., 2022). Unlike conventional methods, microwave radiation may create local strain and atomic vacancies within the crystal lattice through the direct transfer of energy to polar molecules (Martina et al., 2021; Ao et al., 2022). The most common among these defects are oxygen vacancies (O_v), which modify the electronic structure of the photocatalyst and increase visible-light activity (Hardiansyah et al., 2021).

a. Dual Role of Defect Engineering

In photocatalyst design, the management of irregularities such as oxygen vacancies, centers, and surface hydroxyls has a “dual” effect. Controlled defects may form shallow trap centers that prevent the rapid recombination of photogenerated electrons and holes; however, an excessive increase in defect density may generate deep trap levels for charge carriers, thereby reducing catalytic activity or rendering the structure chemically unstable. Therefore, the approach of “maximum defect density = maximum performance” is not always scientifically valid, and optimization is required, as stated in the literature (Martina et al., 2021; Hardiansyah et al., 2021).

5.2. Characterization of Oxygen Vacancies (O_v) and Band-Structure Modification

In microwave-assisted synthesis (MAS) processes, the direct interaction of electromagnetic waves with the dielectric properties of the material triggers structural changes at the atomic level, unlike conventional heating methods (Zhu and Chen, 2014; Becerra-Paniagua et al., 2022; Sanchez Tobon et al., 2022). This volumetric energy transfer provides conditions favorable for the formation of low-valence metal centers, such as the reduction of Ti^{4+} ions to Ti^{3+} within the metal-oxide crystal lattice or changes in the occupation ratios of Zn^{2+} ions in the ZnO structure (Liu et al., 2024; Lu et al., 2020).

To compensate for these new charge variations occurring within the lattice and preserve the electrical neutrality, or ionic balance, of the crystal structure, oxygen atoms leave the lattice, thereby creating oxygen vacancies (O_v) (Liu et al., 2024; Lu et al., 2020; Gong et al., 2025). The rapid and localized “hot-spot” effect provided by microwave energy accelerates this process by reducing the activation energy required for defect formation (Gong et al., 2025; Jain et al., 2025). These controlled defect structures, including Ti^{3+} and O_v , induced by MAS modify the electronic structure of the photocatalyst, narrow the band gap, increase visible-light absorption, and substantially enhance photocatalytic performance by extending the lifetime of photogenerated charge carriers (Liu et al., 2024; Lu et al., 2020; Gong et al., 2025).

Recent studies have demonstrated that, in systems, the use of rutile seed crystals (RS) combined with microwave interaction can increase the concentration to levels as high as 38.56%. This high defect density narrows the band gap of the material from 3.24 to 2.95 eV, shifting photon harvesting toward the visible-light region (Gong et al., 2025). Similarly, Lu et al. (2020) reported that microwave-derived doped structures formed a Schottky barrier with Ag nanoparticles, increasing charge separation by a factor of 14 (Lu et al., 2020).

5.3. Surface Chemistry and Dynamic Defect Analysis

In terms of surface chemistry, microwave synthesis directly affects the density of active sites and hydroxyl groups ($-OH$) on the surface (Jain et al., 2025; Gong et al., 2025). In $Mg(OH)_2$ nanoplatelet systems, increasing the microwave power to 60 W was found to increase surface defects and consequently accelerate the generation of hydroxyl radicals ($\bullet OH$) (Jain et al., 2025).

Particularly in ZnO nanostructures, Liu et al. (2024) reported that oxygen vacancies changed dynamically during the photocatalytic process and that their post-use concentration increased, thereby enhancing the charge-transfer capacity by a factor of 4.27 (Liu et al., 2024). This result demonstrates that defect analysis should be conducted not only during the synthesis stage but also after the reaction in order to elucidate the mechanism. In addition, surface modifications with rare-earth elements such as Ce, Eu, and Y have been reported to occur more homogeneously under microwave irradiation, with these elements decorating the surface rather than entering the lattice and thereby creating new adsorption centers (Bazta et al., 2025).

5.4. Morphology, Porosity, and Surface Area

Morphology control is one of the most visible parameters directly affecting light harvesting and reaction kinetics in photocatalytic systems (Becerra-Paniagua et al., 2022; Kubiak et al., 2024).

Structures such as nanoplates, nanorods, microflowers, or hierarchical porous networks are designed to optimize surface area, active-site accessibility, and mass transfer (Becerra-Paniagua et al., 2022; Liu et al., 2024; Pawar et al., 2024). However, “open” or “porous” structures observed in SEM images may be misleading unless supported by quantitative BET analysis, because visible porosity does not always correspond to a high specific surface area (Ao et al., 2022; Plubphon et al., 2022; Knuth et al., 2024).

ZnO nanostructures provide an ideal model for understanding the effect of microwave power on morphological evolution. Pawar et al. (2024) synthesized highly crystalline ZnO microflowers within only 4 min using a surfactant-free microwave method and reported that the structures obtained at 450 W exhibited sharper edges and a more stable morphology than those prepared at 600 W. In the study, the surface area of the sample obtained at 450 W, which was 24.2 m²/g, decreased to 17.7 m²/g when the power was increased to 600 W. This morphological transformation arises from the influence of microwave power on the crystal-growth directions, particularly the c-axis, thereby promoting flower-like hierarchical structures. However, the increase in performance is explained not only by surface area but also by the synergy between the optical scattering provided by these morphologies and surface defects (Pawar et al., 2024).

In g-C₃N₄ systems, unlike the slow heating of the conventional furnace method, microwave radiation enables rapid expansion of the layered structure and the formation of a honeycomb-like porous morphology. Plubphon et al. (2022) demonstrated that g-C₃N₄ samples synthesized at 800 W for 15 min exhibited a surface area of 60.57 m²/g, which was four times higher than the 14.67 m²/g obtained using the conventional method. This porous structure not only increases the surface area but also maximizes visible-light harvesting by reducing particle size and narrowing the band-gap value from 2.75 to 2.57 eV (Plubphon et al., 2022).

In iron oxide (Fe₂O₃) samples, the inverse relationship between the amorphous–crystalline balance and surface area is particularly noteworthy. Silva et al. (2025) determined that samples treated in a microwave furnace at relatively low temperatures of 200–300°C exhibited an X-ray-amorphous structure and possessed a relatively high BET surface area of 126 m²/g. When the temperature was increased to the range of 400–500°C, the surface area decreased dramatically to 52 m²/g as the degree of crystalline order increased. These findings demonstrate that, for high photocatalytic activity, controlled amorphous regions providing high surface accessibility and a pore volume of 18 m³/g may sometimes be more decisive than a “perfect crystalline structure” (Silva et al., 2025).

In conclusion, morphology control in microwave-assisted design is not merely a process that changes particle shape, but a rational engineering tool that balances pore structure and surface chemistry in favor of performance (Becerra-Paniagua et al., 2022; Kubiak et al., 2024; Jain et al., 2025).

Table 5.1. Representative microwave-assisted synthesis conditions and the resulting structural and functional properties of TiO₂-, Fe₂O₃-, and LDH-based materials

Material/system	Microwave-assisted synthesis conditions	Main structural or morphological outcome	Functional outcome	Reference
TiO ₂	180 °C, 20 min, microwave-assisted hydrothermal synthesis	Predominantly anatase TiO ₂ with an average crystallite size of approximately 7 nm and a specific surface area of 220 m ² g ⁻¹	The as-synthesized sample exhibited higher photocatalytic activity than the heat-treated samples, indicating the importance of balancing crystallinity and surface area	Falk et al., 2018
N/TiO ₂ and N/TiO ₂ /rGO	200 °C, 10 min, microwave-assisted sol–gel treatment	Direct formation of crystalline anatase without additional high-temperature calcination	Photocatalytic activity toward ciprofloxacin degradation; performance depended on composition and charge-carrier behavior	Tobón et al., 2022
Fe ₂ O ₃ nanoparticles	One-step microwave-assisted biofabrication using lichen extract	Fe ₂ O ₃ nanoparticles with an average crystallite size of approximately 20 nm	Approximately 70% acridine orange removal under solar irradiation after 2 h at pH 2 and a catalyst dosage of 0.9 g L ⁻¹	Ahmad et al., 2025
Fe ₂ O ₃ @TiO ₂	Microwave-assisted sol–gel synthesis at 50 °C for 2 min	Core-shell structure with an approximately 4.2 nm TiO ₂ shell formed around Fe ₂ O ₃ particles	Improved visible-light response and reduced charge-carrier recombination compared with uncoated Fe ₂ O ₃	Obaidullah et al., 2024
NiFe-LDH	127.1 °C, 36 min, Ni/Fe molar ratio of 2.854:1	Optimized hydrotalcite-like NiFe-LDH structure and modified optical properties	Experimental norfloxacin removal of 89.14%, in close agreement with the RSM prediction of 88.25%	Niu et al., 2022

6. Comparative Evaluation by Material Families

6.1. Microwave Synthesis of TiO₂-Based Systems

TiO₂ is one of the most extensively investigated semiconductors in the literature on microwave-assisted photocatalyst synthesis owing to its high chemical stability, low toxicity, reasonable cost, and

ability to be produced in different crystalline phases (Linsebigler et al., 1995; Bakardjieva et al., 2006; Bade et al., 2019). Studies in this field generally focus on three main aspects: structural control, defect and doping engineering, and heterostructure–performance relationships (Corby et al., 2021; Pastor et al., 2022; Cai et al., 2025). Therefore, microwave-assisted synthesis is regarded not merely as a method for shortening the reaction time in TiO₂-based systems, but as a versatile materials-design tool capable of simultaneously regulating phase composition, crystallite size, surface area, defect density, and charge-carrier separation behavior (Arun et al., 2022; Purbayanto et al., 2024).

6.1.1. Phase, Crystal Structure, and Morphology Control

Although the anatase phase is commonly obtained in microwave-assisted synthesis studies of TiO₂, photocatalytic performance has been shown to depend not only on phase purity but also strongly on crystallinity, morphology, textural characteristics, and surface properties (Meire et al., 2014; Kubiak et al., 2024). The anatase phase is generally associated with a higher specific surface area, smaller crystallite size, and favorable surface reactivity, whereas the rutile phase may exhibit a narrower band gap and different electronic properties (Al Saleh, 2025). Therefore, optimum activity depends not on the predominance of a single phase, but on the combined balance among phase ratio, crystallite size, surface area, and charge-transfer behavior.

Tobón et al. (2022) reported that the anatase phase could be directly obtained in N/TiO₂ and N/TiO₂/rGO systems through microwave-assisted treatment at 200 °C for 10 min without requiring an additional calcination step. This result indicates that the rapid temperature increase provided by microwave irradiation and the promotion of homogeneous nucleation may contribute to the formation of crystalline anatase within a short processing time (Seol et al., 2012; Tobón et al., 2022). Nevertheless, anatase formation alone is not sufficient to ensure high photocatalytic activity. Indeed, in V/Ag/TiO₂ systems, the simultaneous presence of a rutile–anatase mixture and mesoporosity revealed the combined contribution of interphase charge transfer and surface reactions (Imoisili et al., 2021).

Falk et al. (2018) obtained predominantly anatase-phase TiO₂ nanoparticles with an average crystallite size of approximately 7 nm and a specific surface area of 220 m² g⁻¹ within 20 min at 180 °C using microwave-assisted hydrothermal synthesis. Additional thermal treatment increased anatase crystallinity and induced crystal growth; however, the specific surface area decreased to 65 and 43 m² g⁻¹ at 500 and 600 °C, respectively. The observation of the highest photocatalytic activity in the sample without any additional thermal treatment demonstrates that high crystallinity alone does not guarantee high photocatalytic performance and that an appropriate balance among crystallinity, crystal size, phase composition, and surface area is required.

Microwave temperature and reaction time jointly affect phase formation, crystal growth, and the surface properties of TiO₂. Briševac et al. (2024) showed that no distinct crystalline TiO₂ phase formed in the sample treated at 150 °C for 30 min, whereas the anatase phase developed in samples prepared at 200 °C for 10–30 min. Prolonging the reaction time at the same temperature promoted crystal growth but resulted in a decrease in specific surface area. Among the investigated conditions, treatment at 200 °C for 10 min provided the most favorable balance in terms of crystalline anatase formation, high surface area, and photocatalytic activity. Nevertheless, it would not be appropriate to regard this condition as a universal optimum for all TiO₂ systems, because precursor and solvent type, pH, additives, and reactor characteristics can substantially influence the final structure and performance (Briševac et al., 2024).

Surface area and pore structure are fundamental structural parameters that determine the accessibility of pollutant or reactant molecules to active sites and their adsorption behavior in surface-mediated photocatalytic reactions. Mesoporosity may increase the accessible active surface area by facilitating molecular transport through the pore network; however, photocatalytic performance cannot be explained solely in terms of BET surface area. Payormhorm et al. (2017) demonstrated that improving the surface area and pore organization of TiO₂ through CTAB-assisted microwave synthesis enhanced glucose conversion. Nevertheless, the performance differences observed among samples with similar surface areas revealed that pore size, phase composition, and reactant–surface interactions were also decisive. Similarly, Briševac et al. (2024) reported that the sample with the highest specific surface area did not exhibit the highest photocatalytic activity and that achieving an appropriate balance among crystalline anatase formation, surface area, pore structure, and adsorption capacity was more important. These findings demonstrate that photocatalytic performance should be evaluated not only in relation to

surface area but also together with the nature of accessible active sites, phase composition, adsorption strength, and the behavior of photogenerated charge carriers.

6.1.2. Defect and Doping Engineering

In TiO₂-based systems, microwave synthesis can regulate dopant distribution and defect density within a short time, thereby influencing band structure, surface chemistry, and charge-carrier recombination behavior. Kubiak and Cegłowski (2024) reported that microwave synthesis produced a higher surface area, pronounced PL quenching, and a higher surface Y content in Y-doped TiO₂ samples, and that these characteristics enhanced carbamazepine removal. Dopant-induced defects at an appropriate concentration may act as temporary trapping sites for charge carriers, whereas excessive defect density may accelerate recombination.

In N-doped TiO₂ systems, nitrogen may create new energy levels near the valence band and thereby enhance visible-light absorption; however, excessive N content may lead to the formation of recombination centers (Tobón et al., 2022). Similarly, Ti³⁺ species and oxygen vacancies may enhance visible-light absorption, promote charge separation, and reduce interfacial charge-transfer resistance (Kunthakudee et al., 2024). Ti³⁺ self-doping can narrow the band gap of TiO₂ to as low as 2.14 eV, thereby increasing visible-light absorption (Kato et al., 2019). Likewise, oxygen vacancies generated through a microwave-hydrothermal method were reported to enhance NO₃⁻ adsorption and provide approximately 100% conversion and 87% N₂ selectivity during photocatalytic nitrate reduction (Li et al., 2022).

Co-doping strategies can enhance the visible-light absorption and photocatalytic activity of TiO₂ relative to pristine TiO₂ through the synergistic effects of different dopants (Sirivallop et al., 2020). Nevertheless, dopant type and concentration must be carefully optimized, because excessive doping may reduce performance by creating new recombination centers, blocking surface-active sites, or promoting the formation of undesirable phases.

6.1.3. Heterostructure and Composite Systems

Microwave-assisted synthesis enables TiO₂-based heterojunctions and composites to be formed rapidly with closely contacted interfaces. Interfaces with suitable band alignment may direct electrons and holes toward different phases, thereby suppressing recombination.

Matias et al. (2023) reported that methyl orange degradation reached 85% within 4 h in a g-C₃N₄/TiO₂ heterostructure containing 30% g-C₃N₄ and that the performance was approximately twice that of pristine TiO₂. In TiO₂-CuO systems, the composition ratio was shown to be decisive for photocatalytic performance; in particular, tetracycline degradation reached approximately 95% after 90 min at TiO₂:CuO molar ratios of 9:1 and 7:3 (Kubiak et al., 2020). Similarly, in a truncated bipyramidal TiO₂/Ti₃CN heterostructure prepared using a microwave-assisted hydrothermal method, 97% degradation of methylene blue under UV irradiation within 30 min was reported owing to effective interfacial charge separation (Purbayanto et al., 2024).

Nevertheless, because the total removal measured in supported systems may result from the combined effects of adsorption, direct photolysis, and photocatalytic degradation, dark adsorption equilibrium, photolysis, and appropriate control experiments should be evaluated separately. Moreover, because a decrease in UV-Vis absorbance indicates only the loss of the parent compound or chromophoric structure, it does not constitute evidence of complete mineralization. Therefore, mineralization should be monitored through TOC analysis, whereas the resulting intermediates should, where possible, be identified using chromatographic-mass spectrometric techniques such as LC-MS or GC-MS (Kus et al., 2013; Antonopoulou and Konstantinou, 2016).

Table 6.1. Comparison of microwave-synthesized TiO₂-based systems

System	Key features enabled by microwave-assisted synthesis	Photocatalytic outcome	Reference
Y-TiO ₂	High surface area, PL quenching, and high surface Y content	Enhanced carbamazepine removal	Kubiak and Ceglowski, 2024
N/TiO ₂	Anatase formation and temperature-dependent crystal structure control	High activity in ciprofloxacin degradation	Tobón et al., 2022
g-C ₃ N ₄ /TiO ₂	Effective heterointerface formation and enhanced visible-light absorption	MO degradation: 85% in 4 h	Matias et al., 2023
TiO ₂ -CuO	Heterojunction formation and effect of composition ratio	Tetracycline removal: approximately 95% in 90 min	Kubiak et al., 2020
TiO ₂ /Ti ₃ CN	Facet-controlled growth and efficient charge separation	MB degradation: 97% in 30 min	Purbayanto et al., 2024

The effects of dopant type, heterostructure composition, surface properties, and charge-carrier behavior on the photocatalytic performance of microwave-synthesized TiO₂-based systems are comparatively summarized in Table 6.1. The table demonstrates that performance enhancement cannot be explained solely by anatase formation or high surface area; defect density, phase composition, and heterointerface quality must also be considered together.

6.2. Fe₂O₃-Based Systems

Fe₂O₃ is a promising semiconductor for solar-light-driven photocatalytic systems because of its narrow band gap and ability to absorb visible light. Nevertheless, the rapid recombination of photogenerated electron-hole pairs and limited surface reaction kinetics restrict the photocatalytic performance of pristine Fe₂O₃. In addition to providing short processing times and rapid nucleation, microwave-assisted synthesis enables control over particle size, morphology, and heterointerface formation (Obaidullah et al., 2024; Manikandan et al., 2025).

Ahmad et al. (2024) prepared Fe₂O₃ nanoparticles with an average crystallite size of approximately 20 nm through one-step microwave-assisted biosynthesis using lichen extract. The resulting material was evaluated for acridine orange removal under solar irradiation and achieved approximately 70% color removal after 2 h at pH 2 and a catalyst dosage of 0.9 g L⁻¹. This result demonstrates that microwave methods employing plant or biological extracts as reducing and stabilizing agents may be applied to the rapid production of low-toxicity Fe₂O₃ photocatalysts. Nevertheless, the acidic medium and relatively high catalyst dosage represent limitations that should be considered in real wastewater applications.

Heterostructure design has emerged as a more effective strategy for mitigating the recombination-related limitations of pristine Fe₂O₃. Obaidullah et al. (2024) prepared Fe₂O₃@TiO₂ core-shell nanocomposites using a microwave-assisted sol-gel method by forming an approximately 4.2 nm-thick TiO₂ shell around Fe₂O₃ cores. The TiO₂ coating improved visible-light absorption and interfacial charge transfer, whereas the reduction in PL intensity indicated the suppression of electron-hole recombination. Nevertheless, the high dark adsorption of methylene blue by the composite demonstrates that total removal should not be interpreted solely as photocatalytic degradation.

Similarly, in microwave-prepared ZnO/Fe₂O₃ heterostructures, combining wide-band-gap ZnO with visible-light-responsive Fe₂O₃ provides complementary effects in terms of light absorption and charge separation. Manikandan et al. (2025) reported that ZnO/Fe₂O₃ nanocomposites exhibited photo-Fenton efficiencies of up to 98.2% for the removal of methylene blue and Orange II under solar irradiation in the presence of H₂O₂ after 120 min. However, because this high value depends not only on heterojunction photocatalysis but also on H₂O₂-assisted radical generation, the respective contributions of direct photocatalysis and the photo-Fenton process should be evaluated separately.

The use of Fe₂O₃ in multicomponent systems can further improve charge-carrier separation. Choudhary et al. (2022) prepared α-Fe₂O₃/CoFe₂O₄/Co₃O₄ ternary nanodisks using microwave-assisted co-precipitation and demonstrated that these structures degraded 91.8% of methylene blue under solar irradiation within 24 min. The microwave-derived nanodisks were reported to exhibit longer charge-carrier lifetimes and lower recombination than conventionally prepared nanoparticles. Scavenger

experiments revealed that the •OH radical was the principal active species involved in the degradation process.

MOF-derived Fe₂O₃/ZnO systems represent another strategy that combines porosity with heterojunction effects. Quero-Jiménez et al. (2024) reported that the incorporation of Fe₂O₃ into microwave-prepared NH₂-MOF235(Fe)-derived α -Fe₂O₃/ZnO composites enhanced surface area, visible-light absorption, and the separation of photogenerated charges. Although the optimum composite achieved high degradation rates for a mixture of bisphenol A, 4-tert-butylphenol, and 4-tert-octylphenol, total mineralization remained at 42.52%. This difference demonstrates that the disappearance of the parent pollutant is not equivalent to complete mineralization and that intermediate-product analyses are required.

More recent studies have shown that Fe₂O₃-based multicomponent heterostructures have been developed not only in terms of degradation but also with respect to mineralization and reusability. Luu et al. (2026) prepared an Fe₂O₃/Ce-doped ZnO heterojunction using a microwave-assisted solvothermal method and immobilized the structure on graphene oxide. The resulting ternary composite achieved 97.86% methylene blue degradation under solar irradiation and approximately 71% mineralization according to TOC results, while the performance loss remained below 2% after five cycles. The improved performance was attributed to broadened visible-light absorption, increased surface area, and enhanced interfacial charge transfer.

The anatase-TiO₂/ α -Fe₂O₃ system reported by Lavudya et al. (2026) demonstrates the process-intensification potential of microwave-hydrothermal synthesis. The composites were prepared within 10 min without requiring additional calcination, and the heterogeneous nucleation of TiO₂ on α -Fe₂O₃ generated a closely contacted interface. In the optimized system, effective charge separation supported by PL quenching resulted in 99.9% degradation of methylene blue under visible light. This approach is noteworthy in terms of energy consumption and scalability because of the short synthesis time and elimination of the calcination step.

6.3. Layered Double Hydroxide-Based Systems ,

Layered double hydroxides can be employed in photocatalysis, adsorption, and electrocatalysis because of their tunable divalent and trivalent metal compositions, positively charged hydroxide layers, exchangeable interlayer anions, and modifiable surface properties (Niu et al., 2022; Arshad et al., 2023; He et al., 2025). Nevertheless, the mechanism of total pollutant removal should be clearly defined, and removal described through adsorption kinetics and isotherms should not be considered equivalent to photocatalytic degradation under irradiation (Niu et al., 2022; Komis et al., 2026; Lesbani et al., 2026).

In NiFe-LDH systems, microwave synthesis temperature, treatment time, and the Ni/Fe ratio collectively influence photocatalytic performance. Niu et al. (2022) optimized these three variables using response surface methodology and determined the optimum conditions as 127.1 °C, 36 min, and Ni/Fe = 2.854:1. The model predicted a norfloxacin removal efficiency of 88.25%, whereas the experimentally measured removal efficiency was 89.14%. This result demonstrates that not only temperature or treatment time but also the metal ratio and the interactions among variables should be considered in microwave-assisted LDH synthesis.

Microwave-assisted methods are also used for the direct growth of LDH layers on support materials and for the preparation of core-shell structures. Arshad et al. (2023) prepared a NiFe-LDH@Cu_xO core-shell structure consisting of vertically oriented thin NiFe-LDH nanosheets on Cu_xO supports using a microwave-hydrothermal method. This structure limited nanosheet restacking and agglomeration and contributed to the exposure of a greater number of active sites, facilitated electrolyte diffusion, and reduced interfacial charge-transfer resistance. Because the study focused on the oxygen evolution reaction rather than photocatalysis, the results should be interpreted as the electrocatalytic counterpart of LDH heterostructure design.

Combining LDHs with carbonaceous or biomass-derived supports may provide advantages in terms of surface area, structural stability, and accessibility of active sites. In a microwave-prepared Zn-Fe LDH/magnetic oxidized hydrochar composite, the Pb(II) adsorption capacity was determined as 789.98 mg g⁻¹, which was higher than the capacity of 671.22 mg g⁻¹ obtained for pristine Zn-Fe LDH. The composite could also be magnetically separated and exhibited no substantial performance loss over four cycles (Elshishini et al., 2024).

Similarly, combining Mg/Al-LDH with *Spirulina*-derived hydrochar increased the specific surface area from 2.155 to 16.477 m² g⁻¹. The resulting composite achieved 65.92% selective removal of ciprofloxacin in a multicomponent medium and retained more than 71% of its initial adsorption efficiency after five regeneration cycles. This study should also be evaluated in terms of selective adsorption and reusability rather than photocatalytic degradation (Ramadhan et al., 2026).

In LDH systems functionalized with plant extracts, increasing the number of surface functional groups may improve antibiotic adsorption. *Garcinia mangostana* extract-modified ZnAl-LDH prepared by microwave-assisted precipitation exhibited a maximum adsorption capacity of 119.048 mg g⁻¹ for levofloxacin (Komis et al., 2026). Similarly, modification of NiAl-LDH with the same plant extract increased levofloxacin removal from 47% for pristine NiAl-LDH to 66% (Lesbani et al., 2026).

Overall, performance in microwave-assisted LDH synthesis cannot be explained solely in terms of crystallinity or surface area. Metal ratio, layer morphology, interlayer chemistry, support material, surface functional groups, and heterointerface quality are collectively decisive. Nevertheless, photocatalytic, adsorption, and electrocatalytic results should not be combined under the same performance metric, and each study should be interpreted within its own reaction mechanism and evaluation methodology (Niu et al., 2022; Arshad et al., 2023; Ramadhan et al., 2026).

The principal structural effects, functional contributions, and major limitations of microwave-assisted synthesis in TiO₂-, Fe₂O₃-, and LDH-based systems are comparatively summarized in Table 6.2.

Table 6.2. Comparative effects of microwave-assisted synthesis on TiO₂-, Fe₂O₃-, and LDH-based systems

Material family	Main effects of microwave-assisted synthesis	Functional outcome and main limitation	Representative references
TiO₂-based systems	Rapid anatase formation; control of crystallite size, surface area, Ti ³⁺ /oxygen vacancies, dopant distribution, and heterointerfaces	Improved light absorption and charge separation. Excessive temperature, treatment time, or defect density may cause crystal growth, surface-area loss, and recombination centres.	Falk et al., 2018; Tobón et al., 2022; Briševac et al., 2024; Kubiak and Ceglowski, 2024; Purbayanto et al., 2024
Fe₂O₃-based systems	Control of particle morphology and rapid formation of core-shell, binary, and multicomponent heterostructures	Enhanced visible-light response, interfacial charge separation, and magnetic recovery. Measured removal may also include adsorption or photo-Fenton contributions, while degradation does not necessarily indicate complete mineralization.	Choudhary et al., 2022; Ahmad et al., 2024; Obaidullah et al., 2024; Quero-Jiménez et al., 2024; Manikandan et al., 2025
LDH-based systems	Regulation of metal ratio, lamellar morphology, interlayer chemistry, and direct growth on carbonaceous or inorganic supports	Improved photocatalytic activity, adsorption capacity, active-site accessibility, and interfacial charge transfer. Restacking, aggregation, and limited structural stability remain important constraints.	Niu et al., 2022; Arshad et al., 2023; Elshishini et al., 2024; He et al., 2025; Komis et al., 2026; Lesbani et al., 2026

7. Conclusions and Future Perspectives

In this review, the effects of microwave-assisted synthesis on the structure–property–performance relationships of TiO₂-, Fe₂O₃-, and layered double hydroxide-based systems were comparatively evaluated. The studies examined demonstrate that the contribution of microwave methods is not limited to shortening the reaction time; rapid energy transfer can influence nucleation, crystal growth, phase formation, morphology, porosity, defect density, and heterointerface development. Nevertheless, the synthesis outcome cannot be explained solely by nominal microwave power and treatment time, because the temperature profile, solvent and precursor type, pH, sample volume, reactor geometry, and stirring conditions are also decisive.

In TiO₂-based systems, the formation of the anatase phase within short processing times, regulation of crystallite size and surface area, control of Ti³⁺/oxygen vacancies, and preparation of closely contacted heterostructures emerge as the main advantages of microwave synthesis. However, additional thermal treatment or excessive microwave conditions may lead to crystal growth, surface-area loss, and the formation of new recombination centers. Therefore, high crystallinity, high surface area, or high defect density alone is not an indicator of superior photocatalytic performance.

In Fe₂O₃-based systems, the narrow band gap enables the utilization of visible light, whereas rapid charge recombination limits the activity of pristine Fe₂O₃. Microwave-assisted core-shell, binary, and multicomponent heterostructures can improve charge separation and visible-light response by creating closely contacted interfaces. Nevertheless, the high pollutant-removal values reported in some studies may also include contributions from adsorption or H₂O₂-assisted photo-Fenton processes. Therefore, photocatalytic degradation, the photo-Fenton effect, and dark adsorption should be distinguished from one another.

In LDH-based systems, the combined optimization of microwave synthesis temperature, treatment time, and metal ratio affects layer morphology, interlayer chemistry, and the accessibility of active sites. NiFe-LDH samples have shown promising results in photocatalytic antibiotic removal, whereas supported LDH composites provide advantages in terms of adsorption capacity, selectivity, structural stability, and reusability. Nevertheless, photocatalysis, adsorption, and electrocatalysis results should not be compared using the same performance criterion.

Overall, the highest performance is achieved not by maximizing a single structural parameter, but by establishing a balanced relationship among crystal phase, crystallite size, surface area, defect density, charge-carrier behavior, and heterointerface quality. Moreover, because color removal or parent-compound disappearance does not constitute evidence of complete mineralization, photocatalytic evaluations should be supported by dark adsorption, photolysis, TOC, and, where possible, LC-MS or GC-MS analyses.

Future studies should report not only nominal microwave power but also the actual temperature profile, heating rate, reactor geometry, sample volume, and specific energy consumption. Comparing microwave and conventional heating methods under equivalent temperature-time conditions would enable a more reliable determination of whether the observed effects originate from rapid heating or are specific to the microwave field. Furthermore, increasing the number of studies addressing scale-up, batch-to-batch reproducibility, energy analysis, real wastewater matrices, and long-term stability is essential for transferring microwave-assisted photocatalyst synthesis from the laboratory scale to practical applications

References

- Ab Latif, F. E., Khalid, M., Numan, A., Manaf, N. A., Mubarak, N. M., Zaharin, H. A., & Abdullah, E. C. (2025). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of Ti₃C₂T_x MXene: a sustainable and scalable approach using alkaline etchant. *Journal of Molecular Structure*, 1329, 141407. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.141407>
- Ahmad, W., Ahmed, S., & Kumar, S. (2025). Facile one step microwave assisted biofabrication of Fe₂O₃ NPs: potential application as solar light-driven photocatalyst in the photodegradation of acridine orange. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 105(14), 3309-3324.
- Al Saleh, A. M. (2025). A Review of the Synthesis, Structural, and Optical Properties of TiO₂ Nanoparticles: Current State of the Art and Potential Applications. *Crystals*, 15(11), 944. <https://doi.org/10.3390/cryst15110944>
- Antonopoulou, M., & Konstantinou, I. (2016). Photocatalytic degradation and mineralization of tramadol pharmaceutical in aqueous TiO₂ suspensions: evaluation of kinetics, mechanisms and ecotoxicity. *Applied Catalysis A: General*, 515, 136-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2016.02.005>
- Ao, W., Qu, J., Yu, H., Liu, Y., Liu, C., Fu, J., ... & Jin, Y. (2022). TiO₂/activated carbon synthesized by microwave-assisted heating for tetracycline photodegradation. *Environmental Research*, 214, 113837. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113837>
- Arun, J., Nachiappan, S., Rangarajan, G., Alagappan, R. P., Gopinath, K. P., & Lichtfouse, E. (2023). Synthesis and application of titanium dioxide photocatalysis for energy, decontamination and viral disinfection: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 339-362. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0978-2>
- Arshad, F., Munir, A., Tahir, A., Hussain, S. Z., Jilani, A., Hussain, A., ... & Hussain, I. (2023). Microwave-assisted growth of spherical core-shell NiFe LDH@ Cu_xO nanostructures for electrocatalytic water oxidation reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), 4719-4727. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.252>

- Bade, B. R., Rondiya, S., Bhopale, S. R., Dzade, N. Y., Kamble, M. M., Rokade, A., ... & Funde, A. M. (2019). Investigation of growth mechanism for highly oriented TiO₂ nanorods: the role of reaction time and annealing temperature. *SN Applied Sciences*, 1(9), 1073. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0978-2>
- Bakardjieva, S., Stengl, V., Szatmary, L., Subrt, J., Lukac, J., Murafa, N., ... & Petrova, N. (2006). Transformation of brookite-type TiO₂ nanocrystals to rutile: correlation between microstructure and photoactivity. *Journal of Materials Chemistry*, 16(18), 1709-1716. <https://doi.org/10.1039/b514632a>
- Bazta, O., Ramos-Justicia, J. F., Urbieto, A., Trasobares, S., Fernández, P., Calvino, J. J., & Hungría, A. B. (2025). Rapid microwave hydrothermal synthesis of rare Earth-modified ZnO photocatalysts: Enhanced activity and comprehensive structural analysis. *Surfaces and Interfaces*, 107657. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.107657>
- Becerra-Paniagua, D. K., Díaz-Cruz, E. B., Baray-Calderón, A., Garcia-Angelmo, A. R., Regalado-Pérez, E., del Pilar Rodríguez-Torres, M., & Martínez-Alonso, C. (2022). Nanostructured metal sulphides synthesized by microwave-assisted heating: A review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(29), 22631-22667.
- Briševac, D., Gabelica, I., Ljubas, D., Bafti, A., Matijašić, G., & Ćurković, L. (2024). Effects of TiO₂ nanoparticles synthesized via microwave assistance on adsorption and photocatalytic degradation of ciprofloxacin. *Molecules*, 29(12), 2935. <https://doi.org/10.3390/molecules29122935>
- Cai, B., Pavliuk, M. V., Berggren, G., & Tian, H. (2025). Bio-hybrid photoelectrochemical catalysis for solar fuels and chemicals conversion. *Nature Communications*, 16(1), 9131. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64931-9>
- Calatayud, D. G., Jardiel, T., Peiteado, M., Caballero, A. C., & Fernández-Hevia, D. (2014). Microwave-induced fast crystallization of amorphous hierarchical anatase microspheres. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 273. <http://www.nanoscalereslett.com/content/9/1/273>
- Che, L., Pan, J., Cai, K., Cong, Y., & Lv, S. W. (2023). The construction of pn heterojunction for enhancing photocatalytic performance in environmental application: A review. *Separation and Purification Technology*, 315, 123708. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123708>
- Choudhary, S., Bisht, A., Sharma, M., Krishnan, V., & Mohapatra, S. (2022). Microwave-assisted facile fabrication of α -Fe₂O₃/CoFe₂O₄/Co₃O₄ ternary nanohybrids with highly enhanced photocatalytic activity. *Optical Materials*, 132, 112836. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112836>
- Corby, S., Rao, R. R., Steier, L., & Durrant, J. R. (2021). The kinetics of metal oxide photoanodes from charge generation to catalysis. *Nature Reviews Materials*, 6(12), 1136-1155. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00343-7>
- da Silva, C. P., da Guarda Souza, M. O., Huaman, N. R. C., Neves, I. R., & Brandão, S. T. (2025). Rapid and sustainable synthesis of iron (III) oxide nanoparticles with photocatalytic properties using microwave heating. *Applied Catalysis A: General*, 120551. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2025.120551>
- De Conti, M. C. M. D., Dey, S., Pottker, W. E., & La Porta, F. A. (2023). An overview into advantages and applications of conventional and unconventional hydro (solvo) thermal approaches for novel advanced materials design. *Materials Today Sustainability*, 23, 100458. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100458>
- Dozzi, M. V., Montalbano, M., Marra, G., Mino, L., & Selli, E. (2021). Effects of anatase TiO₂ morphology and surface fluorination on environmentally relevant photocatalytic reduction and oxidation reactions. *Materials Today Chemistry*, 22, 100624. DOI: 10.1016/j.mtchem.2021.100624
- Elshishini, H. M., Elsubriti, G. M., Ghatass, Z. F., & Eltaweil, A. S. (2024). Microwave-assisted synthesis of Zn–Fe LDH modified with magnetic oxidized hydrochar for Pb (II) removal: Insights into stability, performance and mechanism. *Journal of Solid State Chemistry*, 335, 124689. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124689>
- Falk, G. S., Borlaf, M., López-Muñoz, M. J., Fariñas, J. C., Rodrigues Neto, J. B., & Moreno, R. (2018). Microwave-assisted synthesis of TiO₂ nanoparticles: photocatalytic activity of powders and thin films. *Journal of Nanoparticle Research*, 20(2), 23. <https://doi.org/10.1007/s11051-018-4140-7>

- Gong, S., Zhang, T., Liu, B., Liu, P., Niu, Y., Yang, Z., ... & Zhang, L. (2025). Synthesizing mixed-phase TiO₂ semiconductor catalysts via microwave-assisted rutile seed crystal: A new approach. *Ceramics International*, 51(7), 8880-8896. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.319>
- Guo, W., Guo, T., Zhang, Y., Yin, L., & Dai, Y. (2023). Progress on simultaneous photocatalytic degradation of pollutants and production of clean energy: A review. *Chemosphere*, 339, 139486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139486>
- He, C., Mo, W., Guo, W., Huang, Y., Yu, C., Su, X., ... & Ma, S. (2025). Microwave-assisted modification of magnetic Mg/Al/Fe-LDH hydrotalcite for efficient arsenic removal from water. *Journal of Environmental Management*, 381, 125228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125228>
- Hardiansyah, A., Budiman, W. J., Yudasari, N., Isnaeni, Kida, T., & Wibowo, A. (2021). Facile and green fabrication of microwave-assisted reduced graphene oxide/titanium dioxide nanocomposites as photocatalysts for rhodamine 6G degradation. *ACS omega*, 6(47), 32166-32177. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04966>
- Imoisili, P. E., Jen, T. C., & Safaei, B. (2021). Microwave-assisted sol-gel synthesis of TiO₂-mixed metal oxide nanocatalyst for degradation of organic pollutant. *Nanotechnology Reviews*, 10(1), 126-136. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0016>
- Jain, K., Bhatt, P., Chattopadhyay, S., Jain, S. K., & Halder, N. (2025). Tuning the Morphology and defect density of Mg (OH) 2 Nanoplatelets through Microwave-Assisted Wet Synthesis for photocatalytic applications. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.12.469>
- Kato, K., Vaucher, S., Hoffmann, P., Xin, Y., & Shirai, T. (2019). A novel single-mode microwave assisted synthesis of metal oxide as visible-light photocatalyst. *Materials Letters*, 235, 125-128. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.132>
- Knuth, F. A., Knuth, R. D., Ücker, C. L., Riemke, F. C., Raubach, C. W., Moreira, M. L., ... & Cava, S. S. (2024). Photocatalytic properties of BiFeO₃ (BFO) synthesized by microwave-assisted hydrothermal method. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 28(11), 4291-4301. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-06040-z>
- Komis, K., Mardiyanto, M., Fithri, N. A., Hanifah, Y., & Lesbani, A. (2026). ZnAl Layered Double Hydroxide Functionalized with Garcinia mangostana Extract via Microwave-Assisted Synthesis for Levofloxacin Removal. *Water, Air, & Soil Pollution*, 237(10), 610. <https://doi.org/10.1007/s11270-026-09312-8>
- Kubiak, A., Bielan, Z., Kubacka, M., Gabala, E., Zgoła-Grześkowiak, A., Janczarek, M., ... & Jesionowski, T. (2020). Microwave-assisted synthesis of a TiO₂-CuO heterojunction with enhanced photocatalytic activity against tetracycline. *Applied Surface Science*, 520, 146344. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146344>
- Kubiak, A., Zalas, M., & Cegłowski, M. (2024). Innovative microwave in situ approach for crystallizing TiO₂ nanoparticles with enhanced activity in photocatalytic and photovoltaic applications. *Scientific Reports*, 14(1), 12617. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63614-7>
- Kunal, P., & Toops, T. J. (2020). A review of microwave-assisted synthesis-based approaches to reduce Pd-content in catalysts. *Catalysts*, 10(9), 991. <https://doi.org/10.3390/catal10090991>
- Kunthakudee, N., Puangpetch, T., Ramakul, P., Serivalsatit, K., Ponchio, C., & Hunsom, M. (2024). Ultra-fast green synthesis of a defective TiO₂ photocatalyst towards hydrogen production. *RSC advances*, 14(33), 24213-24225. <https://doi.org/10.1039/d4ra04284k>
- Kus, M., Ribbens, S., Meynen, V., & Cool, P. (2013). Microvolume TOC analysis as useful tool in the evaluation of lab scale photocatalytic processes. *Catalysts*, 3(1), 74-87. <https://doi.org/10.3390/catal3010074>
- Lavudya, P. K., Devarakonda, S. S., Chennamsetty, D. K., Ravikiran, N., Vadali, V. S. S., & Ammanabrolu, R. (2026). Microwave Electrification as a Process-Intensification Strategy for Calcination-Free, Scalable, and Sustainable Synthesis of Anatase-TiO₂/α-Fe₂O₃ Photocatalysts. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c12003>
- Lesbani, A., Ahmad, N., Sarwana, W., Hanifah, Y., Komis, K., & Fithri, N. A. (2026). Enhanced Levofloxacin Removal Using Microwave-Assisted Garcinia mangostana Extract-Modified NiAl-LDH. *Surfaces and Interfaces*, 110009. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2026.110009>

- Li, J., & Wu, N. (2015). Semiconductor-based photocatalysts and photoelectrochemical cells for solar fuel generation: a review. *Catalysis Science & Technology*, 5(3), 1360-1384. <https://doi.org/10.1039/c4cy00974f>
- Li, Q., Liu, Y., Wan, Z., Cao, H., Zhang, S., Zhou, Y., ... & Zhang, D. (2022). Microwave-assisted synthesis of oxygen vacancy associated TiO₂ for efficient photocatalytic nitrate reduction. *Chinese Chemical Letters*, 33(8), 3835-3841. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2021.12.025>
- Liu, M., Lv, G., Tian, L., Liu, T., Yu, X., An, X., ... & Liao, L. (2024). Synthesis of self-assembled mesoporous ZnO microspheres designed for microwave-assisted photocatalytic degradation of tetracycline. *Inorganic Chemistry*, 63(43), 20714-20725. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.4c03388>
- Liu, Y., Huang, S., Qian, L., Fan, J., & Zhi, Y. (2026). Microwave-hydrothermal synthesis of FeCo-LDH for photo-assisted asymmetric supercapacitors with enhanced energy storage. *Electrochimica Acta*, 148666. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2026.148666>
- Linsebigler, A. L., Lu, G., & Yates Jr, J. T. (1995). Photocatalysis on TiO₂ surfaces: principles, mechanisms, and selected results. *Chemical reviews*, 95(3), 735-758. <https://doi.org/10.1021/cr00035a013>
- Lu, L., Wang, G., Xiong, Z., Hu, Z., Liao, Y., Wang, J., & Li, J. (2020). Enhanced photocatalytic activity under visible light by the synergistic effects of plasmonics and Ti³⁺-doping at the Ag/TiO₂-x heterojunction. *Ceramics International*, 46(8), 10667-10677. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.073>
- Luu, T. V. H., Dao, N. N., Pham, N. C., Nguyen, Q. B., Nguyen, T. H. C., Dao, N. H., & Nguyen, T. K. (2026). Microwave-assisted synthesis of recoverable Fe₂O₃/Ce-doped ZnO/graphene oxide ternary photocatalyst for efficient solar-light-driven mineralization of organic dye in water. *Inorganic Chemistry Communications*, 116329. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2026.116329>
- Manikandan, V., Elango, D., Subash, V., Jayanthi, P., Al-Ansari, M. M., Dixit, S., ... & Song, K. S. (2025). In-situ treated ZnO/Fe₂O₃ nanocomposites synthesized via microwave for enhanced Photo-Fenton photocatalysis and antimicrobial efficacy. *Materials Science and Engineering: B*, 311, 117779. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117779>
- Martina, K., Cravotto, G., & Varma, R. S. (2021). Impact of microwaves on organic synthesis and strategies toward flow processes and scaling up. *The Journal of Organic Chemistry*, 86(20), 13857-13872. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.1c00865>
- Matias, M. L., Reis-Machado, A. S., Rodrigues, J., Calmeiro, T., Deuermeier, J., Pimentel, A., ... & Nunes, D. (2023). Microwave synthesis of visible-light-activated g-C₃N₄/TiO₂ photocatalysts. *Nanomaterials*, 13(6), 1090. <https://doi.org/10.3390/nano13061090>
- Meire, M., Van Der Voort, P., Van Driessche, I., & Lommens, P. (2014). Microwave assisted synthesis of mesoporous titania and relevant surface interactions with dye molecules. In *Annual meeting of the Belgian Ceramic Society 2014 (BCerS 2014)*. Belgian Ceramic Society (BCerS).
- Niu, J., Albero, J., Atienzar, P., & García, H. (2020). Porous single-crystal-based inorganic semiconductor photocatalysts for energy production and environmental remediation: preparation, modification, and applications. *Advanced Functional Materials*, 30(15), 1908984. <https://doi.org/10.1002/adfm.201908984>
- Niu, J., Ma, Z., Zhang, Y., Shi, J., Yang, L., Yao, B., ... & Wei, H. (2022). Optimization of microwave process parameters in preparation of Ni-Fe hydroxalite by response surface methodology and evaluation of photocatalytic degradation of antibiotic wastewater. *Integrated Ferroelectrics*, 228(1), 192-201. <https://doi.org/10.1080/10584587.2022.2072134>
- Obaidullah, M., Bahadur, N. M., Al Nahid, M. A., Siddiquey, I. A., Furusawa, T., Sato, M., & Suzuki, N. (2024). Microwave assisted sol gel synthesis of Fe₂O₃@ TiO₂ core-shell nanocomposite for the enhanced photocatalytic activity under visible light and the investigation of their optical properties. *Advanced Powder Technology*, 35(12), 104714. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2024.104714>
- Park, H., & Choi, W. (2004). Effects of TiO₂ surface fluorination on photocatalytic reactions and photoelectrochemical behaviors. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(13), 4086-4093. <https://doi.org/10.1021/jp036735i>

- Pastor, E., Sachs, M., Selim, S., Durrant, J. R., Bakulin, A. A., & Walsh, A. (2022). Electronic defects in metal oxide photocatalysts. *Nature Reviews Materials*, 7(7), 503-521. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00433-0>
- Pawar, S. S., Redekar, R. S., & Tarwal, N. L. (2024). Exploring the photocatalytic activity of surfactant-free ZnO micro-flowers synthesized by microwave-assisted method. *Inorganic Chemistry Communications*, 162, 112106. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112106>
- Payormhorm, J., Chuangchote, S., & Laosiripojana, N. (2017). CTAB-assisted sol-microwave method for fast synthesis of mesoporous TiO₂ photocatalysts for photocatalytic conversion of glucose to value-added sugars. *Materials Research Bulletin*, 95, 546-555. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.08.016>
- Plubphon, N., Thongtem, S., Phuruangrat, A., Randorn, C., Kaowphong, S., Narksitipan, S., & Thongtem, T. (2022). Direct microwave heating synthesis and characterization of highly efficient g-C₃N₄ photocatalyst. *Inorganic Chemistry Communications*, 139, 109386. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109386>
- Poppi, G., Colombini, E., Salvatori, D., Balestri, A., Baldi, G., Leonelli, C., & Veronesi, P. (2022). A Multi-Physic Modelling Insight into the Differences between Microwave and Conventional Heating for the Synthesis of TiO₂ Nanoparticles. *Processes*, 10(4), 697. <https://doi.org/10.3390/pr10040697>
- Purbayanto, M. A. K., Chandel, M., Bury, D., Wójcik, A., Moszczyńska, D., Tabassum, A., ... & Jastrzębska, A. M. (2024). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of photocatalytic truncated-bipyramidal TiO₂/Ti₃CN heterostructures derived from Ti₃CN MXene. *Langmuir*, 40(41), 21547-21558. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c02444>
- Quero-Jimenez, P. C., Hernández-Ramírez, A., Guzman-Mar, J. L., Villanueva-Rodriguez, M., Pino-Sandoval, D. A., & Hinojosa-Reyes, L. (2024). Applicability of NH₂-MOF235 (Fe)-derived α -Fe₂O₃/ZnO photocatalyst synthesized by the microwave-assisted method in the degradation of a mixture of phenolic compounds. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 446, 115154. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.115154>
- Ramadhan, N., Mardiyanto, M., Fithri, N. A., Hanifah, Y., & Lesbani, A. (2026). Selective adsorption and reusability of LDH@ microalgae (Spirulina) hydrochar via microwave-assisted synthesis for ciprofloxacin removal: Competitive fluoroquinolone adsorption and mechanistic insight. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 140131. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2026.140131>
- Sari, Y., Gareso, P. L., Armynah, B., & Tahir, D. (2024). A review of TiO₂ photocatalyst for organic degradation and sustainable hydrogen energy production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55, 984-996.
- Sanchez Tobon, C., Panžić, I., Bafti, A., Matijašić, G., Ljubas, D., & Ćurković, L. (2022). Rapid microwave-assisted synthesis of N/TiO₂/rGO nanoparticles for the photocatalytic degradation of pharmaceuticals. *Nanomaterials*, 12(22), 3975. <https://doi.org/10.3390/nano12223975>
- Seol, S. K., Kim, D., Jung, S., & Hwu, Y. (2011). Microwave synthesis of gold nanoparticles: effect of applied microwave power and solution pH. *Materials Chemistry and Physics*, 131(1-2), 331-335. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.09.050>
- Sirivallop, A., Areerob, T., & Chiarakorn, S. (2020). Enhanced visible light photocatalytic activity of N and Ag doped and co-doped TiO₂ synthesized by using an in-situ solvothermal method for gas phase ammonia removal. *Catalysts*, 10(2), 251. <https://doi.org/10.3390/catal10020251>

DO GOVERNANCE AND POLICY COMMITMENT ENHANCE SUSTAINABLE WASH OUTCOMES? THE MODERATING ROLE OF FUNDING EFFECTIVENESS IN KATSINA STATE'S SURWASH PROGRAMME

Yusuf Ahmed Tijjani

Department of Business Administration, Ahmadu Bello University, Zaria, Kaduna State, Nigeria

Email: maitama81@gmail.com

ORCID iD: 0000-0003-3424-7610

Dr. Isyaku Idris

Kastina State Ministry of Water Resource.

Abstract

This study examines how governance and policy commitment enhance sustainable Water, Sanitation, and Hygiene (WASH) outcomes in Katsina State, Nigeria, within the context of the World Bank-funded Sustainable Urban and Rural Water Supply, Sanitation, and Hygiene (SURWASH) Programme. Grounded in Institutional Theory and Resource Dependence Theory, this research conceptualizes governance commitment as a multidimensional construct comprising: Political Will and Leadership Commitment (PW) institutional prioritization, enforcement, and continuity in WASH governance; Institutional Capacity (IC) technical expertise, coordination effectiveness, and administrative capability of WASH agencies; and Community Participation (CP)—local ownership, engagement, and accountability in WASH implementation. Funding Effectiveness (FE) is positioned as both a direct predictor and moderator, capturing resource adequacy, efficiency, transparency, and integration of external financing. Sustainable WASH Outcomes (SWO) is operationalized as improved water access, sanitation coverage, open defecation elimination, hygiene practices, facility functionality, health impacts, and long-term sustainability without external intervention. Using partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) with data from 300 respondents across Katsina State's SURWASH implementing agencies and beneficiary communities, the findings reveal that Institutional Capacity emerges as the strongest significant predictor of sustainable WASH outcomes ($\beta = 0.307$, $p < 0.001$, $f^2 = 0.182$), followed by Political Will and Leadership Commitment ($\beta = 0.396$, $p < 0.001$, $f^2 = 0.486$) and Community Participation ($\beta = 0.194$, $p < 0.001$, $f^2 = 0.171$). Funding Effectiveness demonstrates significant direct effects ($\beta = 0.195$, $p < 0.001$) and moderates the relationship between Institutional Capacity and SWO ($\beta = 0.089$, $p = 0.042$), though not for Political Will or Community Participation. The model explains 86.6% of variance in sustainable WASH outcomes ($R^2 = 0.866$) with strong predictive relevance ($Q^2 = 0.801$) and excellent model fit ($SRMR = 0.018$). This study advances methodological rigor through comprehensive HTMT-based discriminant validity assessment and establishes that governance quality, particularly institutional capacity and political commitment, outweighs funding volume in determining WASH sustainability. The research contributes to WASH governance literature by demonstrating that sustainable outcomes in performance-based financing programmes depend more on absorptive capacity and political prioritization than on resource availability alone.

Keywords: Governance commitment, WASH sustainability, SURWASH programme, institutional capacity, political will, funding effectiveness, performance-based financing, Katsina State.

JEL Classifications: G21, G23, L86, M15, O33, O55.

Introduction

The fourth industrial revolution has fundamentally reconfigured the landscape of higher education, with artificial intelligence emerging as a transformative force that reshapes teaching, learning, and institutional governance across global contexts (Schwab, 2016; Zawacki-Richter et al., 2019). Unlike previous technological waves that augmented specific administrative functions, artificial intelligence penetrates the core strategic processes of educational institutions, demanding new forms of leadership that can navigate algorithmic decision-making, data-driven pedagogy, and human-machine collaboration in ways that were previously unimaginable (Brynjolfsson & McAfee, 2017; Luckin et al., 2016). This transformation is particularly consequential for technical and vocational education institutions, where the mandate to produce industry-ready graduates intersects with accelerating technological change in the labor market, creating both unprecedented opportunities and profound challenges for institutional adaptation and survival (UNESCO, 2022).

The concept of AI leadership has emerged as a critical differentiator between institutions that merely adopt AI tools and those that strategically leverage artificial intelligence to build adaptive capacity and organizational resilience (Duan et al., 2019; Jha et al., 2023). Drawing upon the strategic leadership literature, AI leadership encompasses four interconnected dimensions that together constitute a comprehensive framework for technology-driven institutional transformation (Westerman et al., 2014). Strategic vision involves the clear articulation of AI's role in institutional mission and the alignment of AI initiatives with educational objectives (Jha et al., 2023). Resource allocation refers to the deliberate commitment of budgetary, infrastructural, and human resources to sustain AI implementation (Barney & Hesterly, 2012). Cultural promotion addresses the organizational values, norms, and practices that enable experimentation with AI applications while managing associated risks and resistance (Schein, 2017). Executive commitment provides the visible dedication from senior leadership that signals organizational priority and mobilizes institutional attention (Bass & Riggio, 2006). These dimensions reflect the growing recognition that AI implementation failures in higher education stem less from technical limitations than from leadership deficiencies in managing the complex socio-technical transition that artificial intelligence demands (Selwyn, 2019; Williamson & Eynon, 2020).

However, the organizational resilience literature suggests that leadership-driven technological transformation cannot achieve sustainable adaptive capacity without parallel investments in workforce agility and human capability development (Lengnick-Hall et al., 2011; Ployhart & Moliterno, 2011). Workforce agility the ability to rapidly develop new skills, reconfigure work processes, and maintain effectiveness amid environmental volatility has become particularly salient for female academics in developing economies, who often confront compounded barriers of gender inequality, resource constraints, and institutional fragility that limit their access to professional development opportunities (Sherehiy & Karwowski, 2014; Tseng et al., 2021). The intersection of gender and agility in educational contexts remains under-theorized and empirically underexamined, despite growing recognition that women's underrepresentation in technology leadership and differential access to training create distinctive vulnerability-exposure patterns that can undermine institutional resilience even when leadership is strong (Acker, 2018; O'Connor, 2020).

Nigerian polytechnics present an especially instructive context for examining these dynamics given their unique position within Africa's largest technical and vocational education system. With over 100 federally and state-accredited institutions serving approximately 500,000 students across diverse geographic and economic contexts (NBTE, 2023), Nigerian polytechnics operate at the intersection of multiple disruptions that test institutional resilience on a daily basis (Adeyemo & Oke, 2021). Chronic funding instability plagues these institutions, with federal and state polytechnics operating under divergent resource regimes that create significant variation in capacity for technological investment and human resource development (Okolie et al., 2021). Infrastructure deficits persist despite decades of policy attention, with many institutions lacking reliable electricity, internet connectivity, and modern computing facilities essential for AI integration (Adegbite et al., 2021). Policy regime shifts occur frequently as governments change and educational priorities evolve, creating uncertainty that complicates long-term planning. Brain drain of qualified academic staff to better-resourced universities and private sector opportunities depletes human capital precisely when it is most needed for technological transformation (Oyelaran-Oyeyinka & Lal, 2020). The post-pandemic normalization of

hybrid instructional models has added further complexity, requiring institutions to maintain dual-mode delivery capabilities without commensurate resource increases (Adedoyin & Soykan, 2020; Tijani et al., 2022).

The COVID-19 pandemic exposed acute resilience deficits in Nigerian polytechnics, with many institutions unable to sustain instructional continuity during emergency transitions to remote delivery, revealing the fragility of systems that depended on physical presence and traditional pedagogical methods (Adedoyin & Soykan, 2020; Hodges et al., 2020). Simultaneously, the imperative to integrate AI into technical curricula has intensified as Nigerian employers increasingly demand graduates with data literacy, intelligent systems competencies, and adaptive capabilities that match global standards (Adegbite et al., 2021). This creates a dual pressure: institutions must recover from pandemic disruptions while simultaneously transforming to meet evolving labor market requirements, all within resource constraints that would paralyze less resilient organizations (Caiado et al., 2018).

Within this disrupted environment, female lecturers constitute both a critical human resource and a systematically disadvantaged population whose potential contributions to institutional resilience are often underdeveloped. Women represent approximately 35% of academic staff in Nigerian polytechnics a proportion below gender parity but substantial in absolute numbers yet they face well-documented barriers that constrain their professional development and adaptive capacity (Okeke, 2022; Salau et al., 2022). These barriers include concentration in junior academic ranks with limited access to decision-making authority (Morley, 2014), heavier teaching loads that crowd out research and technology adoption activities (Acker, 2018), limited access to research funding and international networks (O'Connor, 2020), and cultural expectations regarding domestic responsibilities that create time poverty and reduce availability for professional development activities (Salau et al., 2022; White, 2020). These structural disadvantages create a paradox that this study seeks to address: female lecturers' agility is simultaneously essential for institutional resilience and systematically undermined by institutional practices that fail to recognize gender as a dimension of workforce capability development (Mishra & Tripathi, 2021).

The theoretical and practical significance of this study lies in its examination of AI leadership and women's workforce agility as complementary resources for organizational resilience, testing whether these factors operate as independent direct predictors of institutional adaptive capacity. While the strategic management literature emphasizes leadership-driven capability building as the primary engine of organizational adaptation (Teece, 2007, 2018), the human resource management literature highlights workforce agency and distributed capabilities as equally essential for resilience, particularly in contexts where centralized control is limited by resource constraints and environmental complexity (Ployhart et al., 2021).

Integrating these perspectives, this study proposes that organizational resilience in resource-constrained educational contexts emerges from the interplay of enabling leadership conditions and adaptive human capabilities, with both factors contributing directly to institutional outcomes rather than operating through hierarchical dependency relationships (Lengnick-Hall et al., 2011).

Despite the growing policy emphasis on digital transformation in African higher education, empirical evidence regarding the direct organizational mechanisms linking AI leadership and workforce agility to resilience outcomes remains scarce and methodologically limited (Mhlanga, 2023; Zindi, 2020). The existing literature on educational technology in developing contexts predominantly focuses on infrastructure access and student learning outcomes, neglecting the leadership dynamics and workforce capabilities that mediate technology-resilience relationships (Hodges et al., 2020; Rapanta et al., 2020). This omission is theoretically consequential because it treats technology adoption as sufficient for resilience, ignoring the socio-organizational absorptive capacity required to convert technological potential into adaptive performance (Cohen & Levinthal, 1990; Zahra & George, 2002). When leadership and workforce factors are examined, they are typically treated separately rather than as complementary direct predictors, leaving unclear whether institutions should prioritize leadership development, workforce investment, or some combination of both (Jha et al., 2023).

Three interrelated gaps in the literature motivate this study and define its contribution. First, the construct of AI leadership remains insufficiently operationalized in the educational management literature of developing countries, with existing measures often conflating general technology leadership with the specific strategic, cultural, and resource commitments that AI integration demands (Jha et al.,

2023; Williamson, 2021). Second, the relationship between women's workforce agility and organizational resilience, while theorized in the strategic human resource literature, lacks empirical validation in developing-country educational contexts where labor market informality, institutional fragility, and gender inequality reshape the mechanisms of workforce adaptation (Chowdhury et al., 2022; Sherehiy & Karwowski, 2014). Third, the potential complementarity between AI leadership and workforce agility as direct predictors of resilience has not been examined, leaving unclear whether these resources are substitutable or must be developed jointly for maximum resilience impact (Barney & Hesterly, 2012; Ployhart et al., 2021).

The Nigerian polytechnic context amplifies these gaps' practical significance given the sector's importance for national technical workforce development and the severity of disruption exposure these institutions face (NBTE, 2023). Federal and state polytechnics operate under fundamentally different resource regimes, with federal institutions receiving statutory funding through the National Board for Technical Education while state institutions depend on fiscally constrained subnational governments that often fail to meet salary and infrastructure commitments (Adeyemo & Oke, 2021). This funding heterogeneity creates natural variation in AI leadership capacity, yet both sectors face common challenges in developing workforce agility among female lecturers who may lack prior exposure to AI applications and confront time poverty from compounded professional and domestic responsibilities (Okeke, 2022; Salau et al., 2022). Understanding how AI leadership and workforce agility directly contribute to resilience in this context can inform targeted interventions that recognize resource constraints while prioritizing human capability development as institutional infrastructure (Linnenluecke, 2017; Williams et al., 2017).

The specific research questions guiding this study are: To what extent does AI leadership directly affect organizational resilience in Nigerian polytechnics? To what extent does women's workforce agility directly affect organizational resilience? To what extent does AI leadership directly affect women's workforce agility?

These questions test three direct relationships that together constitute a model of complementary resource contributions to organizational resilience, avoiding mediation or moderation assumptions in favor of examining parallel direct effects that may operate simultaneously (Hair et al., 2021).

The study's significance extends across theoretical, practical, and policy domains. Theoretically, it contributes to the educational technology management literature by providing validated measures of AI leadership specific to higher education contexts in developing countries and demonstrating its distinctiveness from general technology leadership constructs (Jha et al., 2023; Williamson, 2021). It extends the organizational resilience literature into developing-country educational settings where institutional fragility makes workforce adaptability especially consequential for survival (Carmeli & Markman, 2011; Linnenluecke, 2017). It contributes to the gender and development literature by centering female lecturers' agency in institutional resilience, countering deficit-oriented framings that portray women primarily as beneficiaries rather than architects of organizational adaptation (Acker, 2018; O'Connor, 2020). Practically, the findings can inform polytechnic governance reforms that prioritize both AI leadership development and gender-sensitive workforce capability building, demonstrating that these investments are complementary rather than competing priorities (Westerman et al., 2014). For policymakers, the study provides evidence for incorporating workforce agility metrics into institutional quality assurance frameworks and funding mechanisms that recognize human capabilities as infrastructure for resilience (Federal Ministry of Communications and Digital Economy, 2020).

Literature Review and Hypothesis Development

Theoretical Framework

Dynamic Capabilities Theory explains how organizations build, integrate, and reconfigure internal and external competencies to address rapidly changing environments (Teece, 2007, 2018). The theory identifies three core capabilities sensing opportunities and threats, seizing value through resource mobilization, and transforming organizational capabilities for continuous alignment that together enable adaptive performance (Teece et al., 1997). AI leadership directly enables these dynamic capabilities in educational contexts by establishing strategic vision for sensing AI opportunities, allocating resources for seizing AI value, and cultivating culture and commitment for transforming organizational processes

(Jha et al., 2023). However, dynamic capabilities operate through ordinary capabilities, the day-to-day operational competencies of organizational members that implement strategic intentions (Winter, 2003). Women's workforce agility represents such ordinary capabilities, the distributed human adaptive capacity through which leadership-enabled opportunities translate into resilient organizational performance (Ployhart & Moliterno, 2011).

Resource-Based View treats AI leadership and workforce agility as valuable, rare, inimitable, and non-substitutable resources that generate sustained competitive advantage (Barney, 1991; Barney & Hesterly, 2012). AI leadership meets these criteria because it requires combinations of technical knowledge, strategic acumen, and change management skills that are scarce in developing-country education sectors and emerge from path-dependent organizational learning (Jha et al., 2023). Women's workforce agility among female lecturers is valuable for maintaining instructional quality amid disruption, rare given gender-specific barriers to skill development, and inimitable because it develops through institution-specific human resource practices and female lecturers' agentic engagement with professional development (Ployhart et al., 2021; Sherehiy & Karwowski, 2014). The Resource-Based View emphasizes resource complementarity value creation through synergistic resource combinations suggesting that AI leadership and workforce agility together generate resilience beyond their separate effects (Barney & Hesterly, 2012).

Hypothesis Development

AI leadership enhances organizational resilience through multiple mechanisms. Strategic vision enables anticipation of disruptions and proactive preparation (Teece, 2007). Resource allocation supports withstanding challenges by ensuring technological and human infrastructure availability (Barney & Hesterly, 2012). Cultural promotion facilitates adaptation by reducing resistance to change and encouraging experimentation (Schein, 2017). Executive commitment drives recovery efforts by signaling organizational priority and mobilizing attention (Bass & Riggio, 2006). Empirical studies in educational contexts confirm that technology leadership predicts resilience outcomes (Arias et al., 2023; Jha et al., 2023).

H₀₁: AI leadership has a significant positive effect on organizational resilience.

Women's workforce agility enhances organizational resilience by enabling rapid skill acquisition, flexible work process reconfiguration, and sustained effectiveness amid environmental volatility (Sherehiy & Karwowski, 2014). Agile lecturers can adapt teaching methods to incorporate new technologies, respond flexibly to policy and funding changes, maintain educational quality during disruptions, and support institutional recovery (Ployhart et al., 2021). For female lecturers specifically, agility represents both a professional capability and a form of resilience capital that counters gender-specific barriers (Chowdhury et al., 2022; Tseng et al., 2021).

H₀₂: Women's workforce agility has a significant positive effect on organizational resilience.

AI leadership builds workforce capabilities through multiple pathways. Resource provision enables training and skill development opportunities (Barney & Hesterly, 2012). Strategic vision clarifies the importance of AI-related competencies and provides direction for capability investment (Jha et al., 2023). Cultural promotion creates psychological safety for experimentation and learning (Schein, 2017). Executive commitment signals that workforce development is an organizational priority worthy of individual effort (Bass & Riggio, 2006). For female lecturers facing gender-specific barriers, leadership support is especially consequential for enabling agility development (Acker, 2018; Salau et al., 2022).

H₀₃: AI leadership has a significant positive effect on women's workforce agility.

Methodology

This study adopts a post-positivist, cross-sectional quantitative survey design employing Partial Least Squares Structural Equation Modeling for data analysis, consistent with established methodological approaches for examining direct relationships among latent constructs in organizational research (Creswell & Creswell, 2018; Hair et al., 2021). The post-positivist philosophical positioning acknowledges that social reality regarding organizational resilience and leadership effectiveness is imperfectly apprehensible through single observations, while maintaining commitment to systematic hypothesis testing, rigorous measurement, and inference regarding direct relationships among constructs (Guba & Lincoln, 1994). The cross-sectional design is appropriate for examining structural relationships

among AI leadership, workforce agility, and organizational resilience as specified in the research hypotheses, though it necessarily limits claims regarding temporal ordering and causal direction that would require longitudinal observation (Maxwell & Cole, 2007). The quantitative approach enables precise estimation of effect magnitudes and generalization from sample findings to the broader population of Nigerian polytechnics, while PLS-SEM specifically suits the study's prediction-oriented objectives and its examination of multiple direct relationships among latent constructs measured through multiple indicators (Hair et al., 2021; Sarstedt et al., 2022).

The population for this study comprises female lecturers and senior academic managers in Nigeria's 100-plus federal and state polytechnics (NBTE, 2023). Purposive sampling was employed to select institutions representing Nigeria's six geopolitical zones and varying resource levels, ensuring geographic and institutional diversity that enhances the generalizability of findings (Creswell & Creswell, 2018). Within selected institutions, female lecturers with minimum one-year service and senior managers with oversight responsibility for AI or digital transformation initiatives were purposively sampled to ensure respondents possessed sufficient organizational experience and topical knowledge to provide valid responses. The final sample of 150 respondents, approximately 10 to 15 per sampled polytechnic, exceeds the minimum threshold of 10 observations per structural path recommended for PLS-SEM and provides adequate statistical power for detecting significant direct effects (Hair et al., 2019, 2021).

Data were collected during February through April 2024 using a structured questionnaire developed through systematic review of validated measures and adapted for the AI context and Nigerian educational setting (Creswell & Creswell, 2018). AI leadership items were adapted from Jha et al. (2023) and Westerman et al. (2014), measuring strategic vision, resource allocation, culture promotion, and executive commitment with six items capturing these four dimensions. Women's workforce agility items were adapted from Sherehiy and Karwowski (2014) and Tseng et al. (2021), measuring adaptive capacity, proactive behavior, and responsive flexibility with seven items capturing these agility components. Organizational resilience items were adapted from Linnenluecke (2017) and Williams et al. (2017), measuring anticipation, adaptation, withstanding, and recovery capabilities with nine items capturing these resilience dimensions. All items employed 5-point Likert scales ranging from 1 for Strongly Disagree to 5 for Strongly Agree, providing sufficient response variability for statistical analysis while maintaining respondent comprehension (Nunnally & Bernstein, 1994). Content validity was established through expert review by three professors in educational management and information systems, while face validity was assessed through pilot testing with 20 respondents excluded from final analysis (Creswell & Creswell, 2018).

Data collection occurred through both online administration using Google Forms and paper-based distribution with research assistants present at selected polytechnics, with follow-up reminders to enhance response rate and reduce non-response bias (Creswell & Creswell, 2018). Of 180 distributed instruments, 150 valid responses were obtained representing an 83.3 percent response rate that minimizes concerns regarding response bias. Ethical approval was obtained from the institutional ethics committee, with informed consent secured from all participants regarding confidentiality, anonymity, and voluntary withdrawal rights, and data stored securely with access limited to the research team (Creswell & Creswell, 2018).

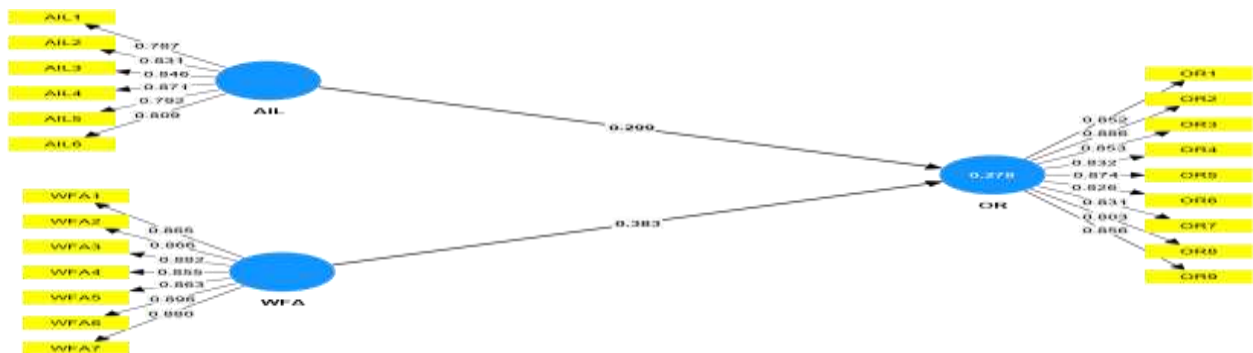
Analysis employed Partial Least Squares Structural Equation Modeling in SmartPLS 4, selected for its appropriateness for prediction-oriented research, its capacity to handle complex models with multiple constructs, and its robustness for exploratory analysis of direct relationships (Hair et al., 2021; Sarstedt et al., 2022). The analysis proceeded in two sequential stages: measurement model assessment evaluating indicator reliability, internal consistency reliability, convergent validity, and discriminant validity; followed by structural model assessment examining path coefficients for the three hypothesized direct relationships, coefficient of determination for explanatory power, effect sizes for practical significance, and predictive relevance through cross-validated redundancy (Geisser, 1974; Hair et al., 2021; Stone, 1974). Bootstrapping with 5,000 subsamples provided robust standard errors and significance tests for all path coefficients (Preacher & Hayes, 2008).

Results

Measurement Model Assessment

Table: Outer Loadings and Construct Reliability

Construct	Item	Loading	Indicator Reliability	Cronbach's α	Composite Reliability (CR)	AVE
AI Leadership (AIL)	AIL1	0.787	0.619	0.905	0.926	0.677
	AIL2	0.831	0.691			
	AIL3	0.846	0.716			
	AIL4	0.871	0.759			
	AIL5	0.792	0.627			
	AIL6	0.809	0.654			
Workforce (WFA)	Agility			0.948	0.957	0.762
	WFA1	0.865	0.748			
	WFA2	0.866	0.750			
	WFA3	0.882	0.778			
	WFA4	0.855	0.731			
	WFA5	0.863	0.745			
	WFA6	0.896	0.803			
Organizational Resilience (OR)	OR1	0.852	0.726	0.950	0.958	0.716
	OR2	0.886	0.785			
	OR3	0.853	0.728			
	OR4	0.832	0.692			
	OR5	0.874	0.764			
	OR6	0.826	0.682			
	OR7	0.831	0.691			
	OR8	0.803	0.645			
	OR9	0.856	0.733			



All outer loadings exceed 0.787, surpassing the 0.70 threshold for acceptable indicator reliability established by Hair et al. (2021). The indicator reliabilities (squared loadings) range from 0.619 to 0.803, confirming that each survey item explains substantial variance in its underlying theoretical construct. The PLS algorithm converged successfully after 300 iterations, with all 22 indicators retained in the final measurement model. The reliability metrics demonstrate excellent internal consistency: Cronbach's alpha values range from 0.905 to 0.950, well exceeding Nunnally and Bernstein's (1994) 0.70 threshold

and indicating strong inter-item correlation within each construct. Composite reliability values (0.926–0.958) exceed the 0.70 criterion recommended by Hair et al. (2021), while AVE values (0.677–0.762) surpass the 0.50 threshold established by Fornell and Larcker (1981), confirming that each construct captures more variance from its own indicators than from measurement error. These results collectively establish that the measurement instrument possesses strong psychometric properties suitable for structural model estimation.

Table: Discriminant Validity

Construct	AIL	WFA	OR
AI Leadership (AIL)	0.823	0.182 (0.195)	0.369 (0.391)
Workforce Agility (WFA)	0.182 (0.195)	0.873	0.437 (0.454)
Organizational Resilience (OR)	0.369 (0.391)	0.437 (0.454)	0.846

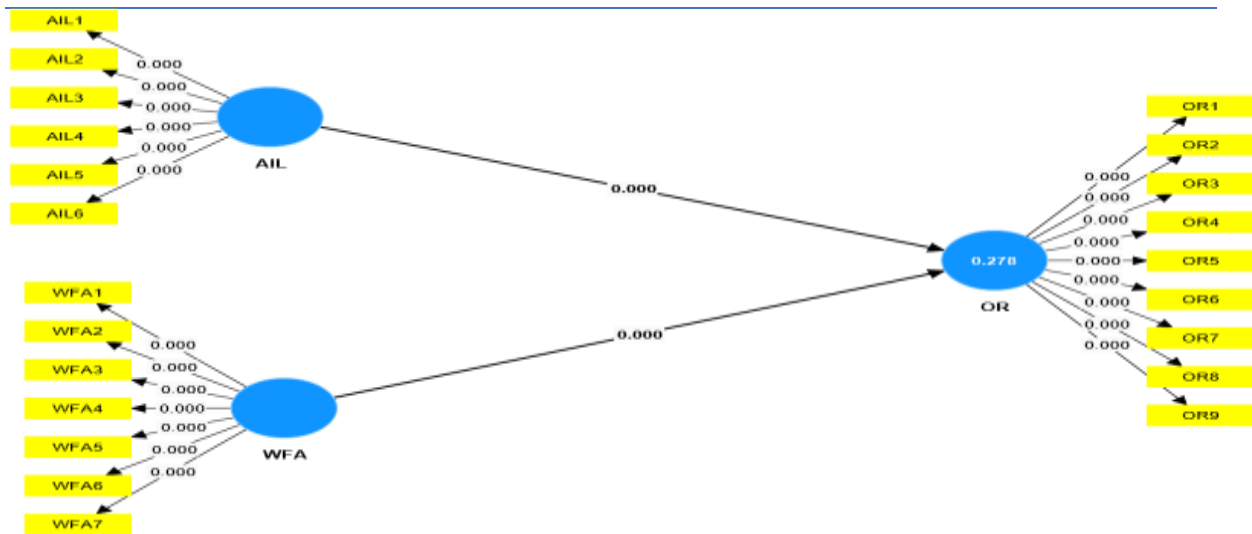
Diagonal (bold) → $\sqrt{AVE}$ (Fornell–Larcker); Lower triangle (plain values) → Correlations; Values in parentheses () → HTMT ratios.

Discriminant validity is confirmed through both established criteria. The Fornell-Larcker criterion (Fornell & Larcker, 1981) requires that the square root of AVE for each construct (bold diagonal values: 0.823, 0.873, 0.846) exceed its correlations with all other constructs (off-diagonal values). This condition is satisfied: AI leadership (0.823) exceeds its correlations with workforce agility (0.182) and organizational resilience (0.369); workforce agility (0.873) exceeds its correlations with AI leadership (0.182) and organizational resilience (0.437); and organizational resilience (0.846) exceeds its correlations with both predictors. Additionally, the Heterotrait-Monotrait (HTMT) ratios (Henseler et al., 2015) range from 0.195 to 0.454, well below the conservative 0.85 threshold and even the more stringent 0.50 criterion suggested by recent research. These results empirically confirm that AI leadership, workforce agility, and organizational resilience are theoretically and empirically distinct constructs, ruling out concerns regarding conceptual overlap or common method bias that could inflate observed relationships.

Structural Model Assessment

Table: Path Coefficients and Hypothesis Testing

Hypothesis Path	β (Coefficient)	Std. Error	t- value	p- value	Decision
H01 AI Leadership → Organizational Resilience	0.299	0.069	4.313	0.000	Supported
H02 Workforce Agility → Organizational Resilience	0.383	0.067	5.755	0.000	Supported
H03 AI Leadership → Workforce Agility	0.412	0.068	6.059		Supported



All three hypotheses receive strong empirical support at the $p < 0.001$ significance level. H01 confirms that AI leadership exerts a statistically significant and positive direct effect on organizational resilience ($\beta = 0.299$, $t = 4.313$), indicating that polytechnics with stronger AI leadership demonstrate enhanced capacity to anticipate, adapt to, withstand, and recover from disruptions. This finding aligns with Jha et al. (2023) and Arias et al. (2023), who similarly identified technology leadership as a resilience resource in educational contexts. The standardized coefficient of 0.299 indicates that a one standard deviation increase in AI leadership corresponds to approximately 0.30 standard deviation increase in organizational resilience, holding workforce agility constant.

H02 reveals women's workforce agility as the strongest predictor of organizational resilience ($\beta = 0.383$, $t = 5.755$), exceeding both the magnitude and statistical significance of AI leadership's direct effect. This finding is theoretically significant: it demonstrates that distributed human adaptive capacity outperforms centralized leadership as a direct resilience resource in the Nigerian polytechnic context. The coefficient indicates that workforce agility contributes approximately 38% of a standard deviation to resilience for each standard deviation increase in agility, holding AI leadership constant. This pattern supports the Resource-Based View emphasis on human capital as a strategic resource (Barney, 1991; Ployhart et al., 2021) and extends Sherehiy and Karwowski's (2014) workforce agility research into developing-country higher education.

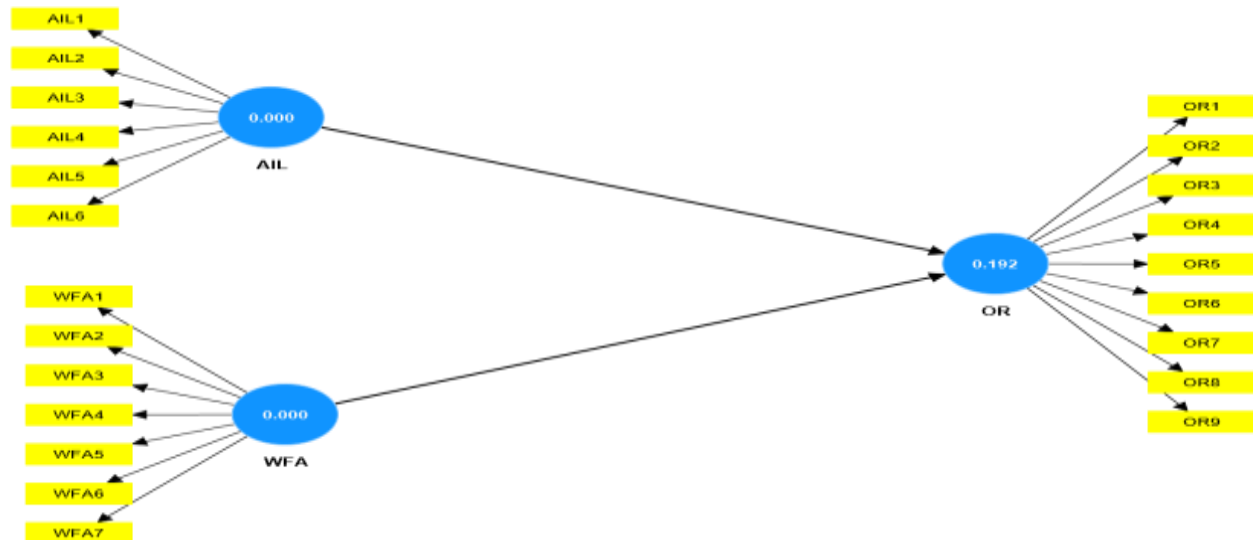
H03 demonstrates that AI leadership significantly builds workforce agility ($\beta = 0.412$, $t = 6.059$), representing the largest path coefficient in the model. This finding indicates that leadership investments in strategic vision, resource allocation, culture promotion, and executive commitment effectively enhance female lecturers' adaptive capacity.

The substantial effect size suggests that leadership is a primary antecedent of workforce agility, supporting Bass and Riggio's (2006) transformational leadership theory and Teece's (2018) dynamic capabilities framework. Notably, while leadership strongly predicts agility ($\beta = 0.412$), agility more strongly predicts resilience ($\beta = 0.383$) than does leadership directly ($\beta = 0.299$), suggesting that leadership's resilience impact is substantially realized through its capacity-building effects on the workforce.

The t-statistics for all paths exceed 4.0, well above the 1.96 threshold for 5% significance and the 3.3 threshold for 0.1% significance recommended by Hair et al. (2021), indicating robust statistical significance that is unlikely to reflect sampling variation. The consistency of significance across all paths strengthens confidence in the model's theoretical specification and empirical validity.

Table: Explanatory Power and Effect Sizes

Path	β	R^2	f^2	Q^2
AI Leadership → Organizational Resilience	0.299	0.278	0.120	0.192
Workforce Agility → Organizational Resilience	0.383		0.196	
AI Leadership → Workforce Agility	0.412	0.170	0.205	0.000



The structural model demonstrates substantial explanatory power and practical significance across multiple criteria. For workforce agility, AI leadership explains 17.0% of variance ($R^2 = 0.170$, adjusted $R^2 = 0.164$), indicating that leadership factors account for nearly one-fifth of the differences in female lecturers' adaptive capacity across polytechnics. The effect size $f^2 = 0.205$ exceeds Cohen's (1988) 0.15 threshold for medium effects, confirming that AI leadership exerts not merely statistically significant but practically meaningful influence on workforce agility development.

For organizational resilience, the combined model with both AI leadership and workforce agility as predictors explains 27.8% of variance (adjusted $R^2 = 26.8\%$), representing substantial explanatory power for organizational research where phenomena are typically multiply determined (Hair et al., 2021). The effect sizes reveal theoretically important patterns: workforce agility exerts a medium effect on resilience ($f^2 = 0.196$), nearly double the small-to-medium effect of AI leadership ($f^2 = 0.120$). This hierarchy of effects reinforces the finding that human-centered capability building yields greater resilience returns than technology-centered leadership investments in this context.

The Q^2 statistic for organizational resilience (0.192) substantially exceeds zero, confirming predictive relevance per Geisser (1974) and Stone (1974). This indicates that the model successfully predicts resilience outcomes for observations not used in parameter estimation, supporting its practical utility for institutional assessment and policy planning. The absence of predictive relevance for workforce agility ($Q^2 = 0.000$) reflects its position as a dependent variable in the model with only one predictor, rather than measurement deficiency.

Discussion

The findings confirm that organizational resilience in Nigerian polytechnics emerges from the direct contributions of both AI leadership and women's workforce agility, with agility operating as the stronger predictor. This pattern challenges technology-centric framings of educational resilience that prioritize infrastructure and leadership over human capabilities (Hodges et al., 2020; Rapanta et al., 2020), demonstrating that in resource-constrained, disrupted contexts, distributed human adaptive capacity outperforms centralized leadership initiatives. The result extends Ployhart et al.'s (2021) argument that

workforce agility is a core organizational resource, applying it to developing-country higher education where human capital may substitute for material resource deficiencies.

The superior performance of workforce agility ($\beta = 0.383$) over AI leadership's direct resilience effect ($\beta = 0.299$) suggests that female lecturers who can rapidly acquire AI skills, adjust teaching methods, and maintain effectiveness amid funding instability and policy shifts constitute institutional infrastructure as critical as technological infrastructure. This finding has significant implications for resource allocation in cash-constrained institutions: investments in women's professional development may yield greater resilience returns than comparable investments in hardware or software (Barney & Hesterly, 2012; Lengnick-Hall et al., 2011). The gender-specific framing is essential here female lecturers' agility is not generic workforce flexibility but a capability developed despite structural barriers, making it rare and valuable per Resource-Based View criteria (Barney, 1991; Salau et al., 2022).

However, AI leadership remains important both directly for resilience and as a builder of workforce agility ($\beta = 0.412$). This complementarity aligns with Dynamic Capabilities Theory: leadership creates conditions for adaptation (sensing, seizing, transforming), while workforce capabilities implement adaptation (Teece, 2007, 2018; Winter, 2003). The absence of mediation analysis in this study does not diminish the practical importance of this relationship leadership investments enable agility development, which independently contributes to resilience. Institutions should pursue both strategies simultaneously rather than choosing between leadership and workforce investments (Barney & Hesterly, 2012).

The 27.8% explained variance, while substantial, indicates that resilience depends on additional factors including financial resources, physical infrastructure, external partnerships, and institutional culture beyond AI-specific dimensions (Caiado et al., 2018; Linnenluecke, 2017). Future research should examine these complementary resources using longitudinal designs to strengthen causal claims (Maxwell & Cole, 2007).

Conclusion

This study demonstrates that AI leadership and women's workforce agility are significant, complementary direct predictors of organizational resilience in Nigerian polytechnics. Workforce agility emerges as the dominant predictor, suggesting that investments in female lecturers' adaptive capacity may yield greater resilience returns than comparable leadership investments. The findings affirm that human-centered capability building is essential for institutional survival in disrupted educational environments, extending Dynamic Capabilities Theory and Resource-Based View into developing-country higher education contexts.

Polytechnics should prioritize gender-sensitive AI leadership development, targeted professional development for female lecturers' agility, flexible work arrangements enabling skill acquisition, and recognition of workforce agility as strategic infrastructure (Westerman et al., 2014). Policymakers should incorporate agility metrics into quality assurance and funding mechanisms that recognize human capabilities as essential institutional resources (Federal Ministry of Communications and Digital Economy, 2020; NBTE, 2023).

References

- Acker, S. (2018). Gendered games of survival in academia: The groans and whimpers of women academics in the neoliberal university. *Gender and Education*, 30(5), 643–656.
- Adegbite, E., Amoah, J., Kwabi, F., & Kwabi, F. (2021). Technology adoption and organizational resilience: Evidence from Nigerian manufacturing firms. *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 120589.
- Adedoyin, O. B., & Soykan, E. (2020). Covid-19 pandemic and online learning: The challenges and opportunities. *Interactive Learning Environments*, 31(2), 863–875.
- Adeyemo, K. S., & Oke, A. O. (2021). Funding and quality of technical and vocational education in Nigeria: Challenges and the way forward. *Journal of Vocational and Technical Education*, 18(1), 45–58.
- Arias, J. J., Barandiarán, J., & Cáceres, P. (2023). Digital leadership and organizational resilience in higher education: Lessons from the COVID-19 pandemic. *Studies in Higher Education*, 48(3), 456–472.

- Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120.
- Barney, J. B., & Hesterly, W. S. (2012). *Strategic management and competitive advantage: Concepts and cases* (4th ed.). Pearson.
- Bass, B. M., & Riggio, R. E. (2006). *Transformational leadership* (2nd ed.). Psychology Press.
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2017). *The business of artificial intelligence*. Harvard Business Review.
- Caiado, R. G. G., Leal Filho, W., Quelhas, O. L. G., de Mattos Nascimento, D. L., & Ávila, L. V. (2018). A fuzzy-based approach to measure circular economy performance in Brazil's manufacturing industry. *Sustainable Production and Consumption*, 17, 1–11.
- Carmeli, A., & Markman, G. D. (2011). Capture, governance, and resilience: Strategy implications from the history of Rome. *Strategic Management Journal*, 32(3), 322–341.
- Chowdhury, S., Schulz, E., Milner, M., & Van Look, J. (2022). Workforce agility for maintaining manufacturing competitiveness. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(2), 333–355.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128–152.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). Sage.
- Duan, Y., Edwards, J. S., & Dwivedi, Y. K. (2019). Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data—evolution, challenges and research agenda. *International Journal of Information Management*, 48, 63–71.
- Federal Ministry of Communications and Digital Economy. (2020). *National digital economy policy and strategy (2020–2030)*. Government of Nigeria.
- Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39–50.
- Geisser, S. (1974). A predictive approach to the random effect model. *Biometrika*, 61(1), 101–107.
- Guba, E. G., & Lincoln, Y. S. (1994). Competing paradigms in qualitative research. In N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), *Handbook of qualitative research* (pp. 105–117). Sage.
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2021). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (3rd ed.). Sage.
- Hair, J. F., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2019). Partial least squares structural equation modeling. In C. Homburg, M. Klarmann, & A. Vomberg (Eds.), *Handbook of market research* (pp. 1–40). Springer.
- Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43(1), 115–135.
- Hodges, C., Moore, S., Lockee, B., Trust, T., & Bond, A. (2020). The difference between emergency remote teaching and online learning. *EDUCAUSE Review*, 27 March 2020.
- Jha, S., Kumar, A., & Pradhan, R. S. (2023). Digital leadership and organizational resilience in higher education institutions: The mediating role of technology absorption capacity. *International Journal of Information Management*, 68, 102594.
- Lengnick-Hall, C. A., Beck, T. E., & Lengnick-Hall, M. L. (2011). Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management. *Human Resource Management Review*, 21(3), 243–255.
- Linnenluecke, M. K. (2017). Resilience in business and management research: A review of influential publications and a research agenda. *International Journal of Management Reviews*, 19(1), 4–30.
- Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. B. (2016). *Intelligence unleashed: An argument for AI in education*. Pearson.
- Maxwell, S. E., & Cole, D. A. (2007). Bias in cross-sectional analyses of longitudinal mediation. *Psychological Methods*, 12(1), 23–44.

- Mhlanga, D. (2023). Artificial intelligence and the future of work in Africa: The fourth industrial revolution and the challenges of sustainable development. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 15(1), 1–15.
- Mishra, P., & Tripathi, A. R. (2021). Workforce agility and organizational resilience: A systematic literature review. *International Journal of Agile Systems and Management*, 14(4), 489–512.
- Morley, L. (2014). *Lost leaders: Women in the global academy*. *Higher Education Research and Development*, 33(1), 114–128.
- National Board for Technical Education (NBTE). (2023). *List of accredited polytechnics in Nigeria*.
- Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- O'Connor, P. (2020). *Women in/and leadership in higher education: A feminist analysis*. Routledge.
- Okeke, C. I. O. (2022). Gender disparities in academic staff development in Nigerian universities: A critical analysis. *Gender and Behaviour*, 20(2), 19376–19392.
- Okolie, U. C., Nwosu, N. T., & Mgebmena, C. C. (2021). Technical and vocational education in Nigeria: Challenges and the way forward. *International Journal of Vocational and Technical Education Research*, 7(1), 22–36.
- Oyelaran-Oyeyinka, B., & Lal, K. (2020). *Institutional capabilities, skills development and Africa's digital transformation*. African Development Bank.
- Ployhart, R. E., & Moliterno, T. P. (2011). Emergence of the human capital resource: A multilevel model. *Academy of Management Review*, 36(1), 127–150.
- Ployhart, R. E., Schmitt, N., & Tippins, N. T. (2021). Solving the supreme problem: The need for a comprehensive, multilevel, and dynamic theory of organizational resilience. *Journal of Applied Psychology*, 106(5), 669–681.
- Preacher, K. J., & Hayes, A. F. (2008). Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models. *Behavior Research Methods*, 40(3), 879–891.
- Rapanta, C., Botturi, L., Goodyear, P., Guàrdia, L., & Koole, M. (2020). Online university teaching during and after the Covid-19 crisis: An academic's perspective from the "frontline". *Education and Information Technologies*, 25(6), 5681–5695.
- Salau, O. P., Owoeye, J. S., & Oladipo, S. A. (2022). Gender and academic career progression in Nigerian universities: A systematic review. *Gender Studies and Research Journal*, 14(2), 112–134.
- Sarstedt, M., Hair, J. F., Nitzl, C., Ringle, C. M., & Howard, M. C. (2022). Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM): A useful tool for family business researchers. *Journal of Family Business Strategy*, 13(1), 100665.
- Schein, E. H. (2017). *Organizational culture and leadership* (5th ed.). Wiley.
- Schwab, K. (2016). *The fourth industrial revolution*. World Economic Forum.
- Selwyn, N. (2019). *What is digital sociology?* Polity Press.
- Sherehiy, B., & Karwowski, W. (2014). The relationship between work environment factors and workforce agility in small enterprises. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(3), 466–473.
- Stone, M. (1974). Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 36(2), 111–133.
- Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319–1350.
- Teece, D. J. (2018). Business models and dynamic capabilities. *Long Range Planning*, 51(1), 40–49.
- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509–533.
- Tijani, Y. A., Dikko, F., & Abdullahi, S. (2022). Digital transformation and organizational resilience in Nigerian higher education: Lessons from the COVID-19 pandemic. *Journal of Educational Technology in Developing Areas*, 4(1), 45–67.
- Tseng, S. M., Lee, P. S., & Wang, C. H. (2021). The relationships among workforce agility, knowledge sharing, and new product development. *Journal of Business Research*, 129, 859–867.
- UNESCO. (2022). *Reimagining our futures together: A new social contract for education*. UNESCO Publishing.

- Westerman, G., Bonnet, D., & McAfee, A. (2014). *Leading digital: Turning technology into business transformation*. Harvard Business Review Press.
- White, K. (2020). *Gender, power, and leadership in higher education*. In J. A. L. Gibton (Ed.), *Research in educational administration and leadership*. Emerald.
- Williams, T. A., Gruber, D. A., Sutcliffe, K. M., Shepherd, D. A., & Zhao, E. Y. (2017). Organizational resilience: Structure and practice. *Journal of Management*, 43(6), 1886–1909.
- Williamson, B. (2021). *Making education digital: Policy, politics and practice*. Emerald.
- Williamson, B., & Eynon, R. (2020). Historical threads, missing links, and future directions in AI in education. *Learning, Media and Technology*, 45(3), 223–235.
- Winter, S. G. (2003). Understanding dynamic capabilities. *Strategic Management Journal*, 24(10), 991–995.
- Zahra, S. A., & George, G. (2002). Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension. *Academy of Management Review*, 27(2), 185–203.
- Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 1–27.
- Zindi, F. (2020). Artificial intelligence for Africa: An opportunity for growth, development, and democratization. *AI and Ethics*, 1(1), 45–53.

**IMPACT OF ELECTRICITY SUPPLY INSTABILITY ON THE FINANCIAL
PERFORMANCE OF SMALL AND MEDIUM ENTERPRISES (SMEs) IN NIGER STATE,
NIGERIA**

Isah Shamsudeen

Department of Economics, School of Secondary Education, Arts and Social Sciences
Umaru Sanda Ahmadu College of Education Minna, Niger State, Nigeria

Corresponding Email: ishamsudeen7@gmail.com

Idris Fatima

Department of Economics, School of Secondary Education, Arts and Social Sciences
Umaru Sanda Ahmadu College of Education Minna, Niger State, Nigeria

Safirat Madaki

Department of Economics, School of Secondary Education, Arts and Social Sciences
Umaru Sanda Ahmadu College of Education Minna, Niger State, Nigeria

Abstract

This study examined the effect of electricity outage frequency on the financial performance of SMEs in Niger State, Nigeria. A descriptive survey research design was adopted, and primary data were collected from 352 SME operators selected through a stratified random sampling technique from a target population of 4,345 registered SMEs. Data were collected using a structured questionnaire, whose validity was established through expert review, while reliability was confirmed using Cronbach's Alpha coefficients of 0.7724 for Electricity Outage Frequency and 0.8158 for Financial Performance. Descriptive statistics and Ordinary Least Squares (OLS) regression analysis were employed to analyze the data at a 5% level of significance. The descriptive findings revealed that respondents agreed that frequent electricity outages disrupt business operations and reduce productivity (Total Mean = 3.13). The regression results further showed that electricity outage frequency has a statistically significant effect on the financial performance of SMEs ($\beta = 0.284$, $t = 4.66$, $p < 0.001$), with the model explaining 78.2% of the variation in financial performance ($R^2 = 0.782$). The study concludes that frequent electricity outages significantly undermine the financial performance of SMEs in Niger State. The study recommends sustained investment in electricity infrastructure and improved power supply reliability to enhance SME productivity, profitability, and long-term business sustainability.

Keywords: Electricity outage frequency; Financial performance; Small and Medium Enterprises.

Introduction

Small and Medium Enterprises (SMEs) constitute the backbone of economic development across both developed and developing economies through their contributions to employment generation, income creation, innovation, and gross domestic product (GDP). Globally, SMEs account for a substantial proportion of business establishments and remain an important driver of inclusive economic growth (Gherghina et al., 2020). Their ability to operate efficiently, however, depends largely on the availability of reliable infrastructure, among which electricity supply occupies a central position. A stable electricity supply enhances business productivity, reduces operational costs, improves production efficiency, and strengthens firms' competitiveness (Calice, 2023).

Across Africa, electricity supply remains one of the most significant infrastructural constraints facing SMEs. The sector accounts for almost 90% of business enterprises on the continent and provides considerable employment opportunities in both urban and rural communities. Despite this contribution, many SMEs experience frequent electricity outages, unstable voltage, and inadequate power supply, which adversely affect business operations (Faso, 2023). The African Development Bank identifies unreliable electricity as one of the principal barriers limiting SME growth in Africa. Recent evidence indicates that more than 80% of SMEs in Sub-Saharan Africa experience frequent power interruptions, resulting in an average annual sales loss of approximately 4.9% (Anushka, 2023).

The Nigerian economy is similarly dominated by SMEs, which account for about 91% of registered businesses, contribute approximately 60% of employment, and generate nearly 48% of the country's Gross Domestic Product (GDP). SMEs also represent about 96% of all businesses and 84% of total employment in Nigeria, highlighting their strategic importance to national economic development (Akanni et al., 2021). Despite their significant contribution, the growth and sustainability of SMEs continue to be undermined by persistent electricity supply challenges. Frequent electricity outages disrupt production processes, increase operating costs, reduce productivity, delay customer service, and compel business owners to rely heavily on costly alternative energy sources such as diesel and petrol generators (Raimi & Raimi, 2022).

The electricity supply situation is particularly severe in Niger State, where SMEs experience prolonged periods of power outages that substantially limit business performance. According to the Small and Medium Enterprises Development Agency of Nigeria (SMEDAN, 2022), more than 75% of SMEs in the state experience frequent electricity interruptions, with average outage durations of approximately 14 hours per day. Although many SMEs require close to 20 hours of electricity daily to sustain efficient operations, they often receive only five to six hours of reliable public electricity supply. Consequently, businesses incur additional operating expenses arising from generator fuel, maintenance costs, equipment breakdowns, production delays, and lost business opportunities.

Among the various dimensions of electricity supply instability, electricity outage frequency represents one of the most direct measures of electricity reliability. Frequent outages interrupt production schedules, reduce labour productivity, damage electrical equipment, delay service delivery, and increase business uncertainty. These disruptions often translate into lower profitability, declining sales, reduced customer satisfaction, and weaker financial performance. SMEs, which typically operate with limited financial reserves, are particularly vulnerable because they possess fewer resources to absorb the additional costs associated with repeated electricity interruptions.

Although previous empirical studies have established a relationship between electricity supply and SME performance in Nigeria (Agu et al., 2018; Udoinyang & Udoinyang, 2023; Sabo & Lekan, 2019), relatively few studies have specifically isolated the effect of electricity outage frequency on the financial performance of SMEs in Niger State using firm-level data. Existing studies have largely concentrated on electricity supply generally or examined broader infrastructural challenges without focusing on outage frequency as a distinct determinant of business financial outcomes. This creates an empirical gap regarding the magnitude of the influence of electricity outage frequency on SME financial performance within the peculiar economic environment of Niger State.

Against this background, this study investigates the effect of electricity outage frequency on the financial performance of Small and Medium Enterprises (SMEs) in Niger State. The findings are expected to contribute to the growing literature on energy economics and SME development while providing empirical evidence that can guide policymakers in designing interventions aimed at improving electricity reliability and enhancing the financial sustainability of SMEs.

Objectives of the Study

The primary objectives for this study is to examine the effect of electricity supply instability on the financial performance of Small and Medium Enterprises (SMEs) in Niger State, specifically the study seek to:

- i. Assess the effect of electricity outage frequency on the financial performance of SMEs in Niger State

Research Hypotheses

- i. H_{01} : Electricity outage frequency has no significant effect on the financial performance of SMEs in Niger State

Literature Review

The study is anchored on the Resource-Based View (RBV) developed by Barney (1991), which posits that organizations achieve sustainable competitive advantage through the effective utilization of valuable, rare, inimitable, and non-substitutable resources. The theory emphasizes that internal resources significantly influence organizational performance and competitiveness.

Within the context of Small and Medium Enterprises (SMEs), reliable electricity supply constitutes a strategic operational resource because it facilitates uninterrupted production, efficient utilization of labour and machinery, timely service delivery, and cost minimization. Conversely, frequent electricity outages reduce the productive capacity of firms by interrupting production schedules, increasing equipment downtime, lowering labour productivity, and compelling businesses to incur additional operational expenses through the use of alternative power sources. Consequently, SMEs experiencing persistent electricity outages are less capable of utilizing their resources efficiently, resulting in reduced profitability and weakened financial performance (Khan et al., 2020).

The Resource-Based View is particularly relevant to this study because it explains how electricity outage frequency affects SMEs' ability to transform their internal resources into superior financial outcomes. The theory therefore provides an appropriate foundation for examining the effect of electricity outage frequency on the financial performance of SMEs in Niger State.

Empirical Literature

Akomolafe (2024) examined the effect of power outages on the performance of Small and Medium Enterprises in Ekiti State, Nigeria. Using a structured questionnaire administered to 114 SMEs, the study found that businesses had access to public electricity for only about two days per week, while stable electricity lasted between one and five hours daily. Consequently, SMEs incurred substantial expenditure on alternative power generation, and frequent power outages significantly reduced business turnover. The study recommended government interventions through tax incentives and subsidies to cushion the adverse effects of unreliable electricity supply on SMEs.

Udoinyang and Udoinyang (2023) investigated electricity supply and the performance of Small and Medium Enterprises in Rivers State, Nigeria. The study adopted a survey research design using structured questionnaires administered to SME operators, while the data were analyzed using the discrete response technique and logistic regression model. The findings revealed that frequent electricity outages significantly reduced productivity, disrupted inventory management, and lowered business revenue. The study concluded that electricity outage frequency constitutes a major constraint to SME growth and operational efficiency.

Yelwa (2023) conducted an empirical analysis of the impact of electricity supply outages on the productivity and profitability of SMEs in Sokoto metropolis. Primary data were collected from 32 SMEs through structured questionnaires and analyzed using the Ordinary Least Squares (OLS) regression technique. The study revealed that over 90% of the sampled enterprises considered electricity outages as a major operational challenge, with firms experiencing an average outage of approximately 180 hours per month. The findings further showed that electricity outages significantly reduced profitability and productivity. The study recommended the establishment of independent power plants and increased investment in renewable energy to improve electricity reliability.

Eyitayo and Makhosazana (2021) examined the impact of electricity outages on the operations of SMEs in Lagos State, Nigeria. The study employed a survey research design involving 110 SME operators selected from three local government areas, while descriptive statistics and chi-square analysis were used for data analysis. The findings established that electricity outages significantly disrupted business operations and adversely affected SME performance. The study recommended stronger collaboration

among federal, state, and local governments to improve electricity generation and supply, while encouraging SMEs to adopt cost-effective backup power solutions.

The empirical studies consistently demonstrate that electricity outage frequency exerts a significant negative influence on SME performance through reduced productivity, declining profitability, increased operational costs, and business disruptions. However, most previous studies focused on other Nigerian states, including Ekiti, Rivers, Sokoto, and Lagos, with limited empirical evidence from Niger State. This geographical gap provides the motivation for the present study, which specifically examines the effect of electricity outage frequency on the financial performance of SMEs in Niger State.

Methodology

This study adopted a descriptive survey research design to examine the effect of electricity outage frequency on the financial performance of Small and Medium Enterprises (SMEs) in Niger State, Nigeria. The target population comprised 4,345 registered SMEs operating across key sectors of the Niger State economy, including manufacturing, agribusiness, retail, food processing, and services, as obtained from the Niger State Ministry of Small and Medium Scale Enterprises (MSMSE, 2025). A stratified random sampling technique was employed to ensure adequate representation of SMEs across the various sectors. Using the Yamane (1967) sample size determination formula with a 5% level of precision, a sample size of 366 SMEs was obtained.

Primary data were collected using a structured questionnaire adapted and modified from previous empirical studies on electricity supply and SME performance. To ensure the validity of the instrument, the questionnaire was subjected to face and content validation by experts in the Department of Economics, Ibrahim Badamasi Babangida University, Lapai. The reliability of the instrument was established through a pilot study involving 50 SME operators outside the study area. Cronbach's Alpha coefficients of 0.7724 for Electricity Outage Frequency and 0.8158 for Financial Performance indicated good internal consistency and confirmed that the instrument was reliable for data collection.

Data were analyzed using both descriptive and inferential statistics. Descriptive statistics, including frequencies, percentages, mean scores, and standard deviations, were used to summarize respondents' perceptions of electricity outage frequency. A criterion mean of 2.50 was adopted for decision-making, where mean values equal to or greater than 2.50 indicated agreement, while values below 2.50 indicated disagreement. To test the study hypothesis, Ordinary Least Squares (OLS) regression analysis was employed at a 5% level of significance. The econometric model estimated the effect of electricity outage frequency on the financial performance of SMEs and is specified as:

$$FP_i = \beta_0 + \beta_1 (EOF_i) + \mu$$

Where:

FP = Financial Performance of SMEs

EOF = Electricity Outage Frequency

β_0 = Intercept

β_1 = Regression coefficient measuring the effect of electricity outage frequency

μ = Error term

Results

Table 1: Mean and Standard Deviation on the Effect of Electricity Outage Frequency on the Financial Performance of SMEs in Niger State (N = 352)

Item	Statement	Mean	SD	Decision
EOF1	Electricity supply to my business is frequently interrupted.	3.22	0.81	Agreed
EOF2	Power outages occur multiple times within a week.	3.15	0.87	Agreed
EOF3	Unpredictable electricity supply disrupts my business operations.	3.04	0.80	Agreed
EOF4	Frequent outages reduce my daily business productivity.	3.12	0.97	Agreed
Grand Mean		3.13	0.67	Agreed

Source: Field Survey, 2026.

Table 1 result indicate that all four statements measuring electricity outage frequency recorded mean values above the criterion mean of 2.50, implying that respondents agreed that electricity outages constitute a major operational challenge. Specifically, respondents agreed that electricity supply is

frequently interrupted ($M = 3.22$, $SD = 0.81$), power outages occur several times within a week ($M = 3.15$, $SD = 0.87$), unpredictable electricity supply disrupts business operations ($M = 3.04$, $SD = 0.80$), and frequent outages reduce daily business productivity ($M = 3.12$, $SD = 0.97$). The grand mean of 3.13 further demonstrates that electricity outage frequency is widely perceived as having an adverse effect on SME operations in Niger State.

Table 2: Ordinary Least Squares (OLS) Regression Result for the Effect of Electricity Outage Frequency on the Financial Performance of SMEs

Variable	Coefficient (β)	Std. Error	t-value	p-value	Decision
Constant	0.842	0.231	3.65	.000	Significant
Electricity Outage Frequency (EOF)	0.284	0.061	4.66	.000	Significant

Source: Field Survey, 2026.

R 0.884
 R^2 0.782
Adjusted R^2 0.779
F-statistic 311.84
Prob > F .000
Sample Size (N) 352

Table 2 OLS regression analysis reveals that electricity outage frequency exerts a statistically significant effect on the financial performance of SMEs in Niger State ($\beta = 0.284$, $t = 4.66$, $p < .001$). The probability value is below the 5% significance level, indicating that electricity outage frequency is a significant predictor of SME financial performance. The model explains approximately 78.2% of the variation in financial performance ($R^2 = 0.782$), while the overall regression model is statistically significant ($F = 311.84$, $p < .001$). These findings indicate that changes in electricity outage frequency are strongly associated with changes in the financial performance of SMEs

Table 3: Hypothesis Tested Result

Hypothesis	P-value	Decision
H0: Electricity outage frequency has no significant effect on the financial performance of SMEs in Niger State.	.000	Rejected

Source: Field Survey, 2026.

The null hypothesis stating that electricity outage frequency has no significant effect on the financial performance of SMEs in Niger State was rejected because the estimated probability value ($p = .000$) is less than the 0.05 level of significance. This finding provides empirical evidence that electricity outage frequency significantly influences the financial performance of SMEs in Niger State. Frequent electricity interruptions disrupt business operations and productivity, thereby affecting the financial outcomes of SME operators.

Discussion of Findings

The findings of this study revealed that electricity outage frequency has a statistically significant effect on the financial performance of Small and Medium Enterprises (SMEs) in Niger State. The descriptive analysis showed that respondents agreed that frequent electricity interruptions disrupt business operations, reduce daily productivity, and adversely affect the overall performance of their businesses. The Ordinary Least Squares (OLS) regression analysis further confirmed that electricity outage frequency is a significant predictor of SME financial performance, leading to the rejection of the null hypothesis that electricity outage frequency has no significant effect on the financial performance of SMEs.

The finding is consistent with Akomolafe (2024), who reported that frequent electricity outages significantly reduced the turnover of SMEs in Ekiti State as businesses experienced limited access to public electricity and incurred substantial costs on alternative power generation. Similarly, the result agrees with Udoinyang and Udoinyang (2023), who found that frequent electricity interruptions

significantly reduced productivity, disrupted inventory management, and lowered business revenue among SMEs in Rivers State, Nigeria.

The present finding also corroborates the study of Yelwa (2023), who established that electricity outages significantly reduced the productivity and profitability of SMEs in Sokoto metropolis. The study reported that over 90 percent of the sampled enterprises identified power outages as a major operational challenge, thereby confirming that unreliable electricity remains one of the most critical constraints to SME performance in Nigeria. Likewise, the finding is in agreement with Eytayo and Makhosazana (2021), who concluded that electricity outages significantly disrupt SME operations and negatively affect business performance, emphasizing the need for improved electricity generation and reliable public power supply.

The finding also supports the Resource-Based View (RBV) developed by Barney (1991), which argues that organizations achieve superior performance through effective access to and utilization of strategic resources. Electricity is a critical operational resource for SMEs because it facilitates continuous production, efficient service delivery, and effective utilization of labour and equipment. Frequent electricity outages reduce firms' ability to utilize these resources efficiently, resulting in production delays, increased operational downtime, lower productivity, and declining financial performance. The result therefore validates the proposition of the Resource-Based View that the availability of essential resources significantly influences organizational performance.

Overall, the findings demonstrate that electricity outage frequency remains a major obstacle to the financial performance of SMEs in Niger State. Frequent interruptions in electricity supply hinder business operations, reduce productivity, increase operational inefficiencies, and ultimately weaken the financial sustainability of small and medium enterprises. The study therefore provides empirical evidence that improving the reliability of electricity supply is essential for enhancing SME productivity, profitability, and long-term business performance.

Conclusion

This study concludes that electricity outage frequency has a significant effect on the financial performance of Small and Medium Enterprises (SMEs) in Niger State. Frequent power interruptions disrupt business operations, reduce productivity, and adversely affect the profitability and overall financial performance of SMEs. The findings highlight the importance of a reliable electricity supply as a critical resource for improving business performance. Therefore, reducing the frequency of electricity outages through improved power infrastructure and reliable electricity service is essential for enhancing the competitiveness, sustainability, and financial performance of SMEs in Niger State.

Recommendation

The study recommends that Federal Government, Niger State Government, and relevant electricity distribution companies should prioritize investments in electricity infrastructure and power system maintenance to reduce the frequency of electricity outages, thereby ensuring a more reliable electricity supply that will enhance the financial performance and sustainability of Small and Medium Enterprises (SMEs) in Niger State.

Reference

- Agu, M., Isichei, E. E., & Olabosinde, T. M. (2018). Infrastructural development and growth of micro, small and medium scale enterprises (MSME). *Academic Journal of Economic Studies*, 4(4), 71–77.
- Akanni, L. F., Oba, R. B., Wahab, B. H., Aluko, M. A., & Kamaluddeen, S. A. (2021). Challenges of small and medium scale enterprises in Nigeria: Evidence from selected SMEs in Kwara State. *African Scholar Journal of Management Science and Entrepreneurship (JMSE)*, 22(7).
- Akomolafe, K. J. (2024). Power outages and the performance of small and medium scale enterprises (SMEs) in Ekiti State, Nigeria. *African Journal of Stability and Development*, 16(2), 418–437.
- Anushka, I. (2023). SME financing, function, and process involved in the SME division of IDLC Finance Limited.
- Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120.
- Calice, P. (2023). Unlocking SME finance in fragile and conflict affected situations. World Bank.

- Eyitayo, O., & Makhosazana, M. (2021). The impact of electricity outages on the operations and contributions of small and medium enterprises (SMEs) to the Nigerian economy. *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)*, 5(11), 304–311.
- Faso, F. (2023). Powering Africa's SMEs: Addressing electricity supply challenges in Africa.
- Gherghina, Ș. C., Botezatu, M. A., Hosszu, A., & Simionescu, L. N. (2020). Small and medium-sized enterprises (SMEs): The engine of economic growth through investments and innovation. *Sustainability*, 12(1), 347.
- Khan, S., & Kazmi, S. H. A. (2020). The impact of resource-based view on the performance of SMEs: Evidence from Pakistan. *Journal of Small Business Management*, 58(3), 508–532.
- Udoinyang, N. U. N., & Udoinyang, N. U. N. (2023). Power supply and the performance of small and medium scale enterprises in Rivers State, Nigeria. *Psocialsciences*, 3(2), 80–99.
- Yelwa, M. A. (2023). Analysis of power outage on small and medium enterprises performance: A case study of internet service cafés in Sokoto metropolis, Sokoto State

COMPLEX IMPEDANCE AND DIELECTRIC RELAXATION BEHAVIOR OF SODIUM SILICATE (Na₂SiO₃) UNDER THERMAL ACTIVATION

Md Ayub Sheikh*

Department of Physics, Central Calcutta Polytechnic, 21, Convent Road, Kolkata-700014, email: dazlingmas99@gmail.com

Sudhangshu Chakraborty

Department of BS&HU (Physics), Asansol Engineering College, Asansol-713305, E-mail: sudhangshu.chakraborty1@gmail.com & sudhangshu.phy@aecwb.edu.in

Abstract

This study investigates the dielectric relaxation behavior of sodium silicate (Na₂SiO₃) with particular emphasis on its temperature-dependent response over a broad frequency range. The dielectric properties are analyzed to understand the influence of thermal activation on polarization and charge transport mechanisms. Multiple polarization processes, including dipolar, ionic, and interfacial polarization, contribute to the material's thermo-active dielectric behavior, particularly at low frequencies where dielectric dispersion is more pronounced. Complex impedance spectroscopy is employed to examine the relaxation dynamics and electrical transport characteristics. The resulting impedance plots reveal the combined effects of thermal energy, charge carrier mobility, and polarization processes on dielectric relaxation. These findings provide valuable insight into the thermo-active mechanisms governing sodium silicate and support its potential application in advanced electro-ceramic and dielectric devices.

Keywords: Sintering; FESEM; thermo-active dielectric relaxation; complex data plot;

1. Introduction

Electro-ceramic materials have attracted considerable research interest because of their diverse applications in electronic, dielectric, sensing, and energy-storage devices. Their excellent thermal stability, chemical durability, low thermal conductivity, and high electrical insulation make them indispensable for capacitors, dielectric resonators, sensors, and other advanced electronic components [1]. The electrical performance of electro-ceramics is strongly governed by their dielectric and impedance characteristics, which are closely related to crystal structure, microstructure, and charge transport mechanisms. Consequently, understanding the dielectric relaxation behavior of these materials under varying thermal conditions is essential for improving their functional performance and expanding their technological applications. Among silicate-based electro-ceramics, sodium silicate (Na_2SiO_3) has emerged as a promising dielectric material owing to its stable orthorhombic crystal structure, ease of synthesis, chemical stability, and favorable electrical properties [2]. In addition to its structural stability, sodium silicate exhibits dielectric characteristics that make it attractive for thermally stable insulating and electronic applications. Since the electrical response of ceramic materials is strongly influenced by grain morphology, grain boundaries, and defects introduced during processing, correlating microstructural characteristics with dielectric behavior is important for understanding their overall performance.

Dielectric relaxation in ceramic materials originates from several polarization mechanisms, including electronic, ionic, dipolar, and interfacial (Maxwell–Wagner) polarization. The contribution of these mechanisms depends on both frequency and temperature, resulting in characteristic variations in dielectric constant, dielectric loss, and electrical conductivity. Complex impedance spectroscopy has become a powerful technique for investigating these phenomena because it enables the separation of grain and grain-boundary contributions while providing valuable information on charge transport, electrical heterogeneity, and relaxation processes [3].

Although numerous investigations have reported the frequency-dependent dielectric and impedance behavior of electro-ceramic materials, comparatively fewer studies have systematically examined the influence of thermal activation on dielectric relaxation in sodium silicate [4,5]. Temperature significantly affects charge carrier mobility, dipole orientation, and interfacial polarization, thereby modifying the dielectric response and relaxation dynamics of ceramic materials. A comprehensive understanding of these thermally activated processes is therefore essential for elucidating the fundamental electrical behavior of sodium silicate and assessing its suitability for high-temperature dielectric applications.

In this work, the complex impedance and dielectric relaxation behavior of sodium silicate (Na_2SiO_3) under thermal activation are systematically investigated. Sodium silicate ceramics were prepared using the conventional solid-state sintering route, and their microstructural characteristics were examined using field-emission scanning electron microscopy (FESEM). The dielectric and impedance properties were measured over the frequency range of 100 kHz to 5 MHz at different temperatures using a HIOKI 3532-50 Hi-TESTER impedance analyzer. The combined analysis of dielectric spectroscopy and complex impedance provides a comprehensive understanding of the influence of thermal activation on polarization mechanisms, relaxation dynamics, and electrical conduction.

The novelty of the present study lies in establishing the relationship between thermal activation, dielectric relaxation, and complex impedance characteristics of sodium silicate ceramics through complementary dielectric and impedance analyses. Particular emphasis is placed on identifying the contributions of grain interiors, grain boundaries, interfacial polarization, and thermally activated charge carriers to the overall dielectric response. The results provide new insight into the electrical behavior of sodium silicate and contribute to the fundamental understanding of thermally activated dielectric relaxation in silicate-based electro-ceramics. Furthermore, the findings offer valuable guidance for the design and optimization of thermally stable dielectric materials for advanced electronic and insulating applications.

2. Sample Preparation

The sodium silicate (Na_2SiO_3) sample was synthesized using a conventional solid-state reaction method. Analytical-grade sodium carbonate (Na_2CO_3) and silicon dioxide (SiO_2) with a purity of 99.9% were used as starting materials. The precursors were weighed according to the required stoichiometric

ratio and thoroughly mixed to ensure compositional homogeneity. To compensate for possible sodium volatilization during high-temperature treatment, an additional 2% excess of each precursor was included in the mixture. The mixed powders were subjected to calcination at **1000 °C for 18 hours** in a high-temperature furnace to promote the formation of sodium silicate. After calcination, the resulting powder was ground again to obtain a fine and uniform particle distribution. The powder was then pressed into **cylindrical pellets of approximately 10 mm diameter and 1 mm thickness** using **polyvinyl alcohol (PVA)** as a temporary binder. Finally, the pellets were sintered at **900 °C for 10 hours** to improve densification and structural stability. The sintered pellets were subsequently used for structural, morphological, and dielectric characterization.

3. Results and Discussions

3.1. X-ray diffraction (XRD)

X-ray diffraction (XRD, figure-1) analysis of sodium silicate (SS) was carried out using a RIGAKU-DENKI II Miniflex diffractometer with Ni-filtered CuK α radiation ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$). Measurements were recorded over a 2θ range of 10° – 90° with a 0.05° step size, and the diffraction data were refined using Peakfit 4.1 software. The XRD pattern displayed sharp, symmetric peaks, confirming the successful synthesis of a well-crystallized, phase-pure material. The identified diffraction peaks correspond to an orthorhombic crystal structure, with refined lattice parameters of $a = 10.466 \text{ \AA}$, $b = 6.03 \text{ \AA}$, and $c = 4.71 \text{ \AA}$, in agreement with reported values (JCPDS card no: 72-0079). The absence of secondary phases highlights the high structural quality of sodium silicate, validating its suitability for dielectric relaxation studies.

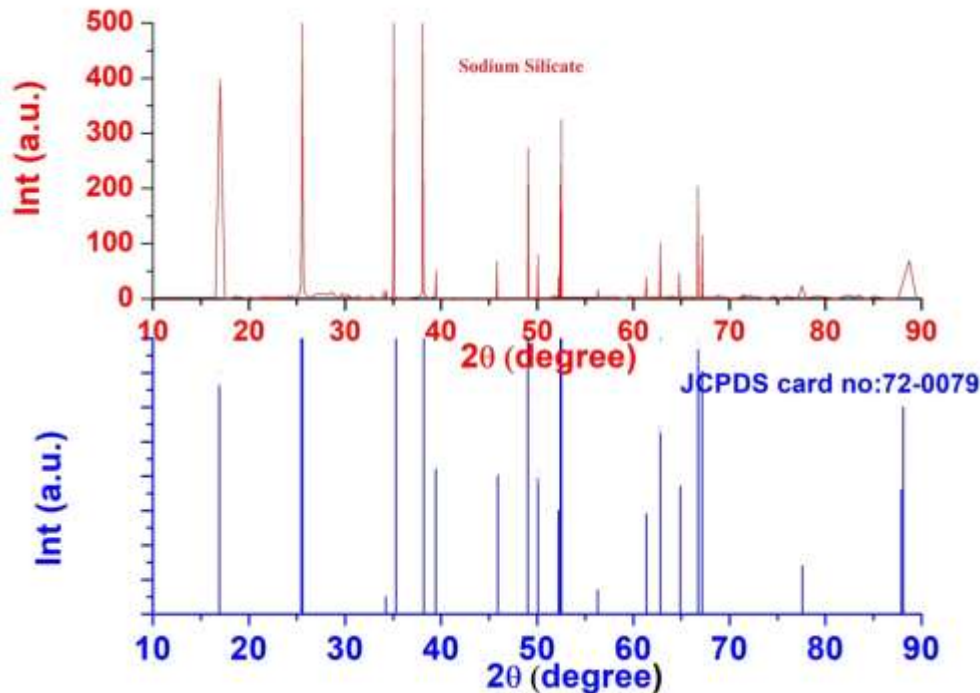


Figure 1. XRD image of sodium silicate

3.2. FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) of the Sample

The surface morphology of sodium silicate (SS) was analyzed using a Zeiss Gemini 500 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM), offering 0.5 nm resolution at 15 kV and magnification from $50\times$ to $2,000,000\times$. High-resolution imaging (figure-2) provided detailed insights into the material's surface and microstructural features. Sintered sodium silicate exhibited a compact, plate-like morphology with uniformly distributed fine grains in the range of 0.19 – $0.21 \mu\text{m}$. The absence of significant porosity and consistent grain size indicate successful densification and high structural uniformity. Such a dense and homogeneous microstructure enhances dielectric behavior and mechanical

strength, confirming the material's suitability for electro-ceramic applications. The refined structure also ensures stability under high-frequency and thermally active conditions.

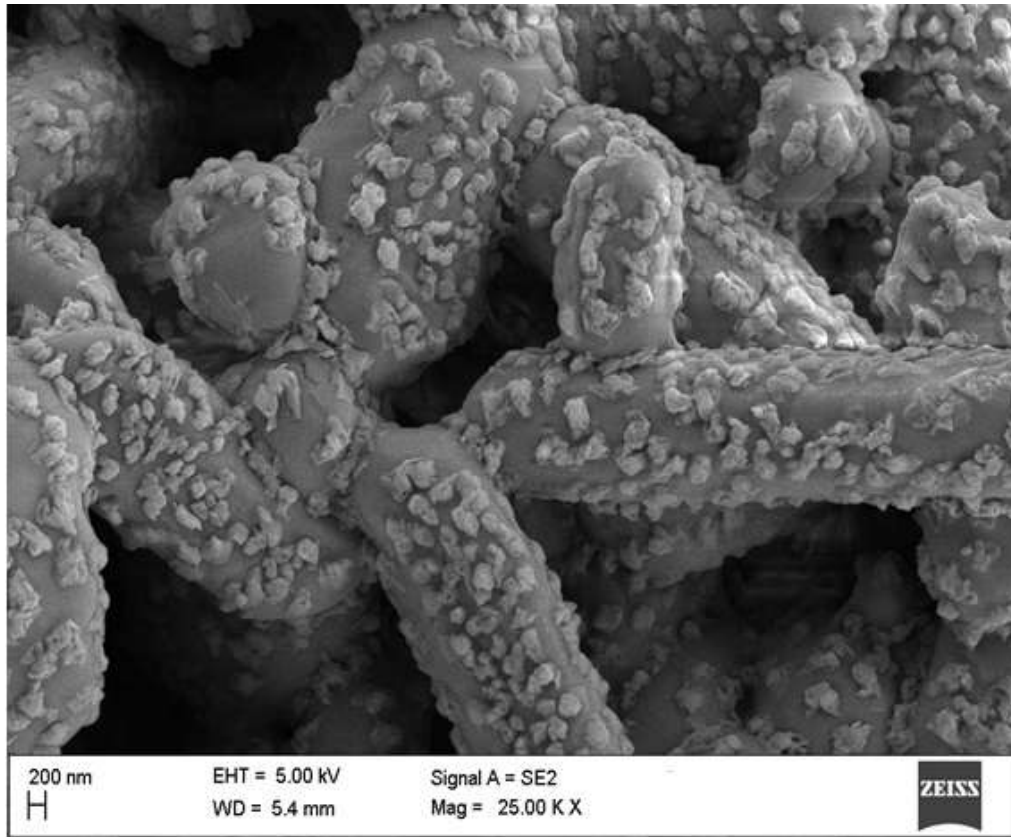


Figure 2. FESEM of Sodium Silicate

3.3. Dielectric relaxation study and data collection

All measurements were performed using a Hioki 3530-50 HiTester Impedance Analyzer (Japan) within a frequency range of 100 kHz–5 MHz and a temperature span of 50°C–450°C. This high-precision instrument enabled real-time evaluation of complex impedance (Z), dielectric loss ($\tan \delta$), complex capacitance (C), and phase angle (θ), offering detailed insight into the electrical behavior of sodium silicate (SS). Such parameters are essential for analyzing dielectric relaxation under thermal excitation. The combined frequency and temperature variations captured the dynamic polarization mechanisms and highlighted key transitions and loss processes. This comprehensive approach provides a strong basis for understanding thermo-active dielectric behavior, ensuring accurate evaluation of SS performance and stability in electro-ceramic applications, particularly for insulation and advanced electronic systems [2].

3.4. Dielectric Relaxation through Dielectric Spectroscopy

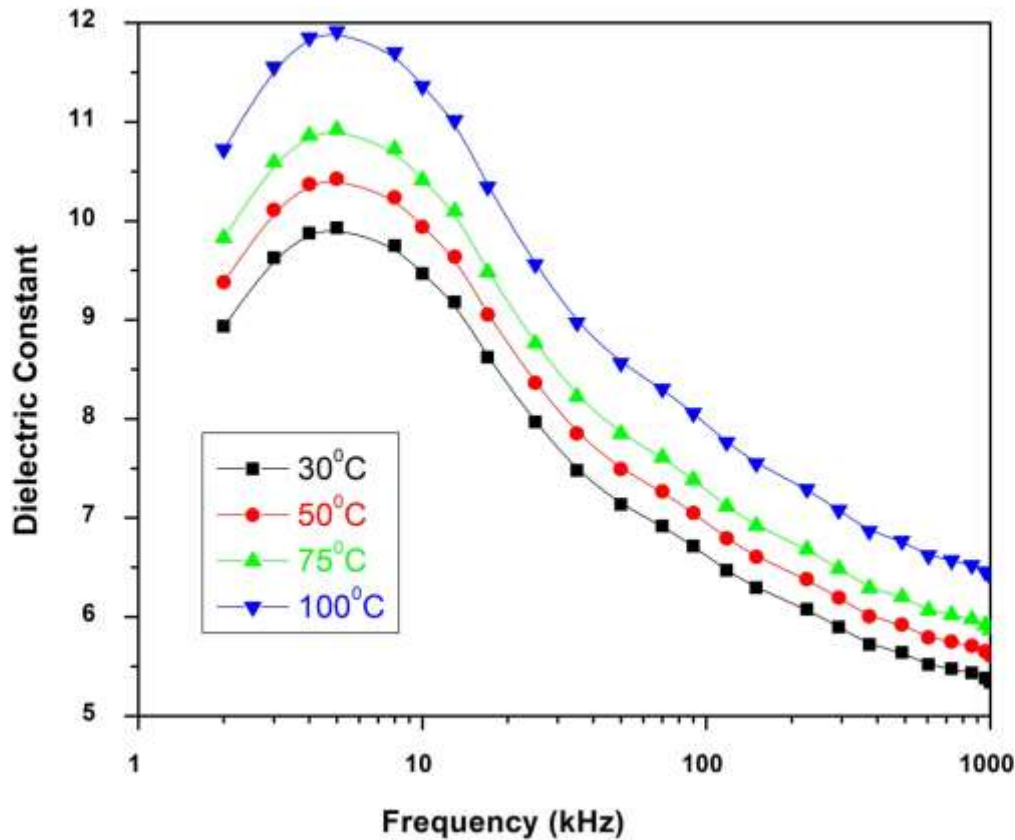


Figure 3. Variation of dielectric constant of sodium silicate (dots represent experimental data and lines represent fitted curves)

The dielectric response of sodium silicate (SS) was systematically investigated as a function of temperature and frequency to elucidate its polarization mechanisms and dielectric relaxation behavior. Figure 3 presents the variation of the dielectric constant (ϵ') with frequency at different temperatures. At lower temperatures, the dielectric constant remains relatively low over the entire frequency range, indicating limited polarization due to the restricted mobility of charge carriers. As the temperature increases, a noticeable enhancement in the dielectric constant is observed, particularly in the low-frequency region. This increase is attributed to the thermal activation of charge carriers, which enhances dipolar orientation, space-charge accumulation, and interfacial polarization, thereby strengthening the overall polarization of the material [3].

A pronounced dielectric dispersion is evident at lower frequencies, where the dielectric constant decreases rapidly with increasing frequency. This behavior is characteristic of Maxwell–Wagner interfacial polarization and space-charge effects, which arise from the accumulation of charges at grain boundaries, defects, and other heterogeneous interfaces. At low frequencies, these polarization mechanisms can effectively follow the applied alternating electric field, resulting in higher dielectric constant values. However, as the frequency increases, the periodic reversal of the electric field becomes too rapid for these relatively slow polarization processes to respond, leading to a progressive reduction in their contribution to the overall dielectric response [4,5].

Above approximately 1 MHz, the dielectric constant approaches a nearly frequency-independent value, indicating that the slower polarization mechanisms have become inactive. In this high-frequency region, the dielectric response is dominated by the much faster electronic and ionic polarization processes, which possess considerably shorter relaxation times. Consequently, the dielectric constant exhibits only minor variations with frequency. The transition from strong low-frequency dispersion to a stable high-

frequency response clearly demonstrates the dielectric relaxation behavior of sodium silicate and reflects the different relaxation times associated with the various polarization mechanisms.

The dielectric loss ($\tan \delta$) also exhibits a pronounced dependence on both temperature and frequency. An increase in temperature leads to higher dielectric loss due to enhanced charge carrier mobility and increased electrical conductivity, resulting in greater energy dissipation within the material. The effect is particularly significant in the low- and intermediate-frequency regions, where interfacial polarization, dipolar relaxation, and space-charge conduction contribute substantially to dielectric loss. As the frequency increases, these mechanisms gradually lose their ability to follow the rapidly oscillating electric field, causing the dielectric loss to decrease. Beyond the high-frequency region, the dielectric response is governed primarily by intrinsic lattice polarization, including ionic displacement and electronic polarization, while the contribution from space-charge accumulation becomes negligible [4]. The observed dielectric behavior confirms that both temperature and frequency strongly influence the electrical response of sodium silicate. The increase in dielectric constant and dielectric loss with temperature demonstrates that thermal activation promotes polarization and facilitates charge transport within the material. Simultaneously, the pronounced low-frequency dispersion followed by stabilization at higher frequencies provides clear evidence of thermally activated dielectric relaxation. These findings indicate that the dielectric response of sodium silicate is governed by the combined effects of dipolar, interfacial, ionic, and electronic polarization mechanisms operating over different relaxation time scales. The results provide valuable insight into the fundamental dielectric characteristics of sodium silicate and support its potential application in thermally stable dielectric and electro-ceramic devices.

3.5. Dielectric Relaxation through Complex Impedance Spectroscopy

The Nyquist plot is a powerful technique for investigating the complex impedance behavior of dielectric materials, providing valuable information about their electrical transport and relaxation mechanisms. For sodium silicate (SS), the Nyquist plots shown in Figure 4 were analyzed over a range of temperatures to evaluate the influence of thermal activation on the dielectric response. The plots represent the imaginary component of impedance (Z'') as a function of the real component (Z'), allowing the separation of contributions from grain interiors, grain boundaries, and electrode polarization.

The experimental impedance spectra were interpreted using an equivalent circuit model consisting of grain resistance (R_g), grain boundary resistance (R_{gb}), and constant phase elements (CPEs) to account for the non-ideal capacitive behavior arising from structural and compositional heterogeneity. Accordingly, the total impedance of the material can be expressed as:

$$Z = Z' + iZ'' \quad (1)$$

For an ideal Debye dielectric, the impedance corresponding to a single relaxation process is represented by:

$$Z = \frac{R}{1 + i\omega RC} \quad (2)$$

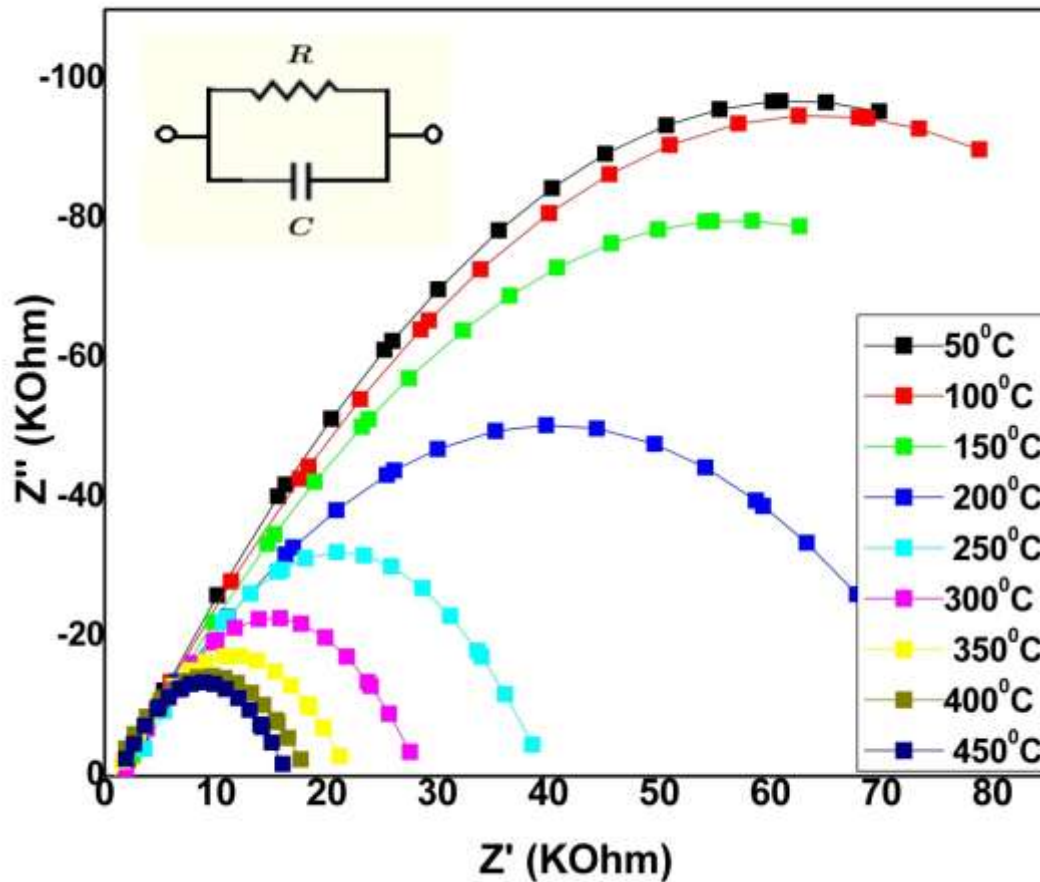


Figure 4. Nyquist plot at different temperatures (dots represent experimental data and lines represent fitted curves)

However, the experimental Nyquist plots exhibit depressed semicircular arcs instead of perfect semicircles, indicating a clear deviation from ideal Debye relaxation. Such behavior is characteristic of non-Debye relaxation, where the dielectric response is governed by a distribution of relaxation times rather than a single relaxation time. This phenomenon is effectively described by incorporating a constant phase element (CPE) into the equivalent circuit model, which accounts for non-uniform current distribution, microstructural disorder, surface roughness, and local variations in conductivity.

The close agreement between the experimental data and the fitted impedance spectra demonstrates the suitability of the proposed equivalent circuit model in describing the electrical response of sodium silicate. The depressed nature of the semicircular arcs confirms the existence of heterogeneous relaxation processes associated with the complex microstructure of the material. Such non-ideal behavior originates from variations in grain size, defects, compositional fluctuations, and localized charge carrier dynamics, which broaden the relaxation time distribution.

The impedance spectra further reveal distinct contributions from both grain interiors and grain boundaries. The larger semicircle observed in the intermediate- to low-frequency region is primarily associated with grain boundary resistance, where charge carriers encounter significant barriers while crossing intergranular interfaces. This response is attributed to Maxwell–Wagner interfacial polarization, resulting from charge accumulation at interfaces separating regions of different electrical conductivity. In contrast, the smaller high-frequency semicircle corresponds to the bulk (grain) response, reflecting the comparatively lower resistance and faster conduction pathways within the grain interiors. A closer examination of the impedance spectra indicates the presence of additional, very small overlapping semicircular features, particularly at elevated temperatures. These weak arcs suggest simultaneous contributions from grain boundaries, bulk grains, and possibly electrode–sample interfaces. Such overlapping relaxation processes are commonly modeled using multiple resistor–CPE

combinations, reflecting the coexistence of several electrically active regions within the material. Furthermore, the asymmetry and depression of the semicircular arcs become more pronounced with increasing temperature, providing additional evidence for multiple relaxation mechanisms and a broad distribution of relaxation times.

Temperature has a significant influence on the impedance characteristics of sodium silicate. As the temperature increases, the diameters of the semicircular arcs progressively decrease, indicating a reduction in the electrical resistance of both grain interiors and grain boundaries. Simultaneously, the arcs shift toward higher frequencies, demonstrating a decrease in relaxation time due to enhanced mobility of charge carriers and increased dipolar reorientation under thermal activation. These observations confirm that the conduction mechanism in sodium silicate is thermally activated.

The increase in temperature also promotes interfacial and dipolar polarization, leading to an enhancement of the dielectric constant. The improved polarization response arises from the increased mobility of ionic charge carriers and the easier orientation of dipoles under an alternating electric field. Consequently, both dielectric relaxation and electrical conductivity are significantly enhanced at elevated temperatures.

Overall, the Nyquist analysis demonstrates that the dielectric behavior of sodium silicate is governed by the combined effects of grain interiors, grain boundaries, and interfacial polarization. The depressed semicircular arcs, overlapping relaxation processes, and systematic temperature-dependent frequency shifts collectively confirm the non-Debye nature of dielectric relaxation in the material. The excellent agreement between the experimental and fitted impedance spectra validates the equivalent circuit model employed in this study. These findings indicate that sodium silicate possesses thermally stable, frequency-dependent dielectric characteristics with enhanced charge transport at elevated temperatures, making it a promising candidate for electroceramic, dielectric, and high-temperature electronic applications.

4. Conclusions

Dielectric relaxation in sodium silicate exhibits strong temperature dependence, where increasing temperature enhances charge carrier mobility and dipole reorientation, leading to shorter relaxation times. Microstructural characteristics, including grain size, grain boundaries, and porosity, significantly affect interfacial polarization. Thermo-activation energy and the applied electric field together govern the material's overall thermo-active dielectric response.

Competing Interests: The authors declare that they have no conflicts related to patents, funding sources, or affiliations that could bias the findings or conclusions of this work.

References

- [1] Sudhangshu Chakraborty and Md. Ayub Sheikh; "Temperature-dependent relaxation dynamics in sintered sodium silicate: A CIS approach"; *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*; <https://doi.org/10.1142/S2424913026500013>, Volume : 11, Number 01, DOI: 10.1142/S2424913026500013., 30 January 2026.
- [2] Md. Ayub Sheikh, Sudhangshu Chakraborty; Spectroscopic Approach to Understanding Complex Impedance in Sodium Silicate; *Physics Open*; Volume- 23 , No-1, May 2025, page 100255.
- [3] Md. Ayub Sheikh and Sudhangshu Chakraborty, "Temperature-Dependent Dielectric Relaxation and Complex Impedance Analysis Sodium Silicate Ceramics", *Conscientia*, Volume:-XIV (special Issue); Year : December 2025, Page No : 395-403.
- [4] Sudhangshu Chakraborty; Exploring Frequency-Dependent Dielectric Relaxation in Bakelite: A Concise Report; *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*; VOLUME 9 . NUMBER 4 . 2024, 161-166.
- [5] Junwei Liu, Qiaoli Liu, Pinwen Zhu; "Dielectric relaxations without colossal permittivity in Mg and Nb co-doped BaTiO₃ ceramic"; *Ceramics International*; Volume 49, Issue 24, Part A, 15 December 2023, Pages 40623-40629.

**DEVELOPMENT OF A NATURAL BIOINDICATOR FROM POMEGRANATE PEELS FOR
SUSTAINABLE pH DETECTION**

Dovletova Shirinjemal,

Oguz han Engineering and technology university of Turkmenistan, Department of Ecology and
Ecologic technologies
shirinjemaldovletova006@gmail.com

Melebayeva Oguljennet

Oguz han Engineering and technology university of Turkmenistan, Department of Ecology and
Ecologic technologies

ABSTRACT

The increasing environmental impact of synthetic chemicals has accelerated the search for eco-friendly and biodegradable alternatives in laboratory and analytical applications. This study focuses on the development of a natural bio-indicator produced from pomegranate peels, an agricultural waste material rich in anthocyanins and polyphenolic compounds. The bio-indicator was prepared using a simple aqueous extraction method without toxic solvents or complicated processing techniques. The obtained extract demonstrated clear color variations under different pH conditions, changing from reddish-yellow in acidic media to dark brown and greenish tones in alkaline environments. The natural indicator exhibited rapid response behavior, good sensitivity, and full biodegradability under natural conditions. In addition, the utilization of pomegranate peel waste contributes to sustainable waste management and circular economy practices. The developed bio-indicator provides a low-cost, safe, and environmentally compatible alternative to conventional synthetic indicators and shows potential applications in educational laboratories, environmental monitoring, and sustainable analytical systems.

Keywords: Bioindicator, Pomegranate peel, Anthocyanins, Natural pigments, Agricultural waste, Green chemistry, Sustainable materials, pH-sensitive compounds.

INTRODUCTION

The extensive use of synthetic chemicals in modern laboratories has significantly contributed to environmental pollution and hazardous waste generation. Conventional acid–base indicators such as phenolphthalein and methyl orange are widely used for analytical purposes; however, their production and disposal may involve toxic substances harmful to both human health and ecosystems (9). Consequently, scientific attention has increasingly shifted toward the development of natural and biodegradable alternatives based on renewable resources.

Natural bio-indicators extracted from plants have emerged as promising substitutes for synthetic indicators due to their non-toxic nature, biodegradability, and environmental compatibility. Many plant materials contain pigments that respond visibly to pH variations through structural transformations of their chemical compounds. Among these pigments, anthocyanins are particularly important because they exhibit distinct color changes depending on acidic or alkaline conditions (1).

Pomegranate (*Punica granatum*) is widely cultivated in many regions of the world and generates substantial quantities of peel waste during juice and food processing operations. Although commonly discarded, pomegranate peels are rich in anthocyanins, tannins, flavonoids, and other polyphenolic substances with strong antioxidant and colorimetric properties (2,3). The reuse of such agricultural waste materials not only reduces environmental burdens but also creates opportunities for sustainable material innovation.

Several studies have investigated natural indicators derived from red cabbage, hibiscus flowers, and berry extracts. However, research concerning pomegranate peel-based indicators remains comparatively limited despite the high concentration of bioactive compounds found in the peel fraction. Furthermore, many previously reported extraction techniques require expensive solvents or sophisticated laboratory equipment, limiting their accessibility in low-resource settings.

This study aims to develop a sustainable bio-indicator from pomegranate peels using a simple and low-cost extraction method. The research evaluates the pH sensitivity, color response, stability, and environmental compatibility of the prepared extract. The outcomes contribute to green chemistry approaches and demonstrate the potential of agricultural waste valorization in producing eco-friendly analytical materials.

LITERATURE REVIEW

Environmental concerns associated with synthetic chemicals have encouraged the scientific community to explore biodegradable and renewable alternatives for industrial and laboratory applications. Green chemistry principles emphasize minimizing hazardous substances while promoting sustainable material usage (9). In this context, naturally derived indicators have gained considerable attention because of their low toxicity and biodegradability.

Anthocyanins are water-soluble pigments commonly found in fruits, flowers, and vegetables. These compounds are highly sensitive to pH variations due to reversible structural transformations occurring in acidic and alkaline environments. Giusti and Wrolstad (2003) reported that anthocyanins exhibit red coloration under acidic conditions and gradually shift toward blue and green shades in alkaline media (1). This property enables their use as natural pH indicators.

Pomegranate peels represent a valuable source of anthocyanins and phenolic compounds. According to Singh et al. (2018), pomegranate peel contains higher antioxidant activity and polyphenol concentrations than the edible fruit portion itself (3). Additional research demonstrated antimicrobial and antioxidant activities of pomegranate peel extracts, further supporting their multifunctional potential in sustainable material applications (4).

Recent studies have focused on the incorporation of natural pigments into biodegradable films and smart packaging systems capable of monitoring food freshness and environmental conditions (5,6). Agricultural waste materials have become especially attractive due to their abundance, low cost, and contribution to circular economy strategies.

Despite significant progress in natural indicator development, many existing systems rely on complex extraction processes involving organic solvents or industrial equipment. Therefore, there

remains a need for simple, low-cost, and environmentally friendly extraction methods suitable for educational and small-scale applications. The present research addresses this gap by producing a bio-indicator from pomegranate peels using an accessible water-based extraction technique.

MATERIALS AND METHODS

Materials

The primary raw material used in this study was pomegranate peel collected from locally available pomegranate fruits. Distilled water served as the extraction solvent because of its environmental safety and availability. Hydrochloric acid (HCl), sodium hydroxide (NaOH), vinegar, baking soda solution, soap solution, and lemon juice were used for pH analysis.

Preparation of Pomegranate Peel Powder

Fresh pomegranate peels were washed thoroughly with distilled water to remove dirt and impurities. The peels were then dried at room temperature for five days until complete moisture removal was achieved. After drying, the peels were crushed and ground into fine powder using a laboratory grinder.

Extraction Procedure

Twenty grams of pomegranate peel powder were mixed with 200 mL of distilled water in a glass beaker. The mixture was heated at 70°C for approximately 30 minutes under continuous stirring to facilitate pigment extraction. After heating, the solution was filtered using filter paper to remove solid residues and obtain a clear reddish-brown extract rich in natural pigments.

The prepared extract was cooled to room temperature and stored in sealed glass containers at 4°C for further analysis.



Figure 1. *Process of mixing*

Bioindicator Testing

The pH sensitivity of the extract was evaluated using various acidic, neutral, and alkaline solutions. A few drops of pomegranate peel extract were added to each test solution, and color changes were visually observed and recorded.



Figure 2. Bioindicator testing in exhibition center

RESULTS AND DISCUSSION

Color Transformation Properties

The pomegranate peel extract demonstrated distinct color transitions in response to pH variations. Under acidic conditions, the indicator displayed reddish-yellow and orange shades, while neutral solutions produced brown coloration. In alkaline media, the extract gradually shifted toward dark brown and greenish tones.

These color transformations are associated with structural changes in anthocyanin molecules triggered by hydrogen ion concentration differences. The results confirm the effectiveness of pomegranate peel extract as a natural pH-sensitive bio-indicator.

Response Time and Sensitivity

The developed indicator exhibited rapid response characteristics, with visible color changes occurring within seconds after contact with test solutions. The sensitivity of the extract was sufficient for clear differentiation between acidic and alkaline conditions.

Compared to conventional synthetic indicators, the natural extract offers safer handling conditions and reduces exposure to hazardous chemicals. Although the sharpness of color transitions may be slightly lower than commercial indicators, the environmental advantages make the natural indicator highly attractive for sustainable laboratory applications.

Stability Analysis

Storage studies revealed that refrigerated samples maintained acceptable color stability for approximately two weeks, whereas room-temperature samples experienced gradual pigment degradation after several days. Exposure to light and oxygen accelerated color fading due to anthocyanin oxidation reactions.

These observations suggest that low-temperature storage conditions improve the shelf life and performance stability of the bio-indicator.

Sustainability and Environmental Impact

The production process requires inexpensive materials, minimal energy consumption, and no toxic solvents. Since pomegranate peels are commonly discarded as agricultural waste, their utilization contributes to waste reduction and resource recovery strategies.

Furthermore, the extract is biodegradable and environmentally safe, generating no harmful residues after disposal. The developed bio-indicator therefore supports green chemistry principles and sustainable educational practices while promoting circular economy concepts.

CONCLUSION

This study successfully developed a natural bio-indicator from pomegranate peels using a simple and environmentally friendly extraction method. The obtained extract exhibited clear pH-sensitive color changes due to the presence of anthocyanins and polyphenolic compounds naturally found in pomegranate peel biomass.

The prepared indicator demonstrated rapid response behavior, biodegradability, low production cost, and environmental compatibility, making it a promising alternative to conventional synthetic indicators. In addition, the research highlights the importance of agricultural waste valorization in sustainable material development.

Future investigations may focus on improving pigment stability, incorporating the indicator into biodegradable films, and expanding its applications in smart packaging and environmental sensing technologies.

REFERENCES

1. Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2003). Anthocyanins: Characterization and measurement with UV-visible spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*.
2. Jaiswal, V., DerMarderosian, A., & Porter, J. R. (2010). Anthocyanins and polyphenol oxidase from dried arils of pomegranate. *Food Chemistry*, 118(1), 11–16.
3. Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., & Singh, N. (2018). Phenolic compounds as beneficial phytochemicals in pomegranate peel. *Food Research International*, 44(7), 1925–1934.
4. Pagliarulo, C., De Vito, V., Picariello, G., Colicchio, R., Pastore, G., & Salvatore, P. (2016). Inhibitory effect of pomegranate peel extract on bacterial growth. *Food Chemistry*, 190, 824–831.
5. Sharif, N., Khoshnoudi-Nia, S., & Jafari, S. M. (2017). Development of bio-based intelligent packaging materials containing natural indicators. *Trends in Food Science & Technology*, 65, 86–96.
6. Prietto, L., Mirapalhete, T. C., Pinto, V. Z., Hoffmann, J. F., & Vanier, N. L. (2017). pH-sensitive films containing anthocyanins extracted from agricultural residues. *Food Hydrocolloids*, 65, 333–340.
7. Kaderides, K., Papaoikonomou, L., Serafim, M., & Goula, A. M. (2015). Microwave-assisted extraction of phenolics from pomegranate peels. *Food Chemistry*, 176, 92–98.
8. Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2015). *Introduction to Organic Laboratory Techniques: A Microscale Approach*. Cengage Learning.
9. Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.
10. Spierling, S., Röttger, C., Venkatachalam, V., Mudersbach, M., Herrmann, C., & Endres, H. J. (2018). Bio-based plastics and circular economy perspectives. *Procedia CIRP*, 69, 573–578.

**SUSTAINABLE FABRICATION OF A NATURAL POLYMER-BASED BIOPLASTIC USING
AGAR, GELATIN, AND GLYCERIN: A LOW-COST APPROACH TO ECO-FRIENDLY
MATERIAL DESIGN**

Dovletova Shirinjemal,

Oguz han Engineering and technology university of Turkmenistan, Department of Ecology and
Ecologic technologies
shirinjemaldovletova006@gmail.com

Yuldashov Bahadir

Oguz han Engineering and technology university of Turkmenistan, Department of Ecology and
Ecologic technologies

ABSTRACT

The growing accumulation of petroleum-based plastics has intensified the need for sustainable, biodegradable alternatives. This study introduces a novel bioplastic formulated from agar agar, gelatin, and glycerin—natural, renewable materials processed through a simple and low-cost method. The composition leverages agar's structural strength, gelatin's elasticity, and glycerin's plasticizing effect to achieve an optimal balance of flexibility and durability. Experimental analyses indicate that the material forms uniform, translucent films with good mechanical performance and complete biodegradation within 4–8 weeks under soil conditions. Water solubility tests confirm its high environmental compatibility and safe decomposition without toxic residues. The production process requires no specialized equipment, enabling practical implementation for educational, packaging, and eco-design applications. This research demonstrates an accessible and sustainable approach to bioplastic fabrication, offering a viable pathway toward reducing dependence on conventional plastics and supporting global circular economy goals.

Keywords: Bioplastic, Agar agar, Gelatin, Glycerin, Biodegradability, Sustainable materials, Eco-friendly polymers, Circular economy.

INTRODUCTION

Plastics have become indispensable to modern society, serving critical roles in packaging, medicine, construction, and technology. However, the same characteristics that make them versatile—durability, chemical resistance, and low production cost—have also rendered them one of the most persistent pollutants in the environment. Over 400 million tons of plastic are produced annually, yet less than 10% is effectively recycled. The remainder accumulates in landfills and aquatic ecosystems, fragmenting into microplastics that contaminate soil, water, and food chains. These particles have been detected in marine organisms, drinking water, and even human tissues, posing significant ecological and health concerns. The persistence of synthetic polymers, derived primarily from non-renewable fossil fuels, further exacerbates carbon emissions and resource depletion, making the plastic crisis a defining environmental challenge of the 21st century.

In response, global scientific efforts have increasingly turned toward bioplastics—materials derived from renewable biological sources capable of partial or complete biodegradation. While bioplastics such as polylactic acid (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHA) represent important advancements, their industrial synthesis often involves complex fermentation processes, costly feedstocks, or the need for specialized composting facilities. Consequently, large-scale adoption remains constrained, particularly in regions lacking advanced waste management infrastructure. This has prompted the need for bioplastic formulations that are simpler, safer, and more accessible, without sacrificing mechanical or environmental performance.

Recent studies have explored natural polymers such as agar, gelatin, starch, chitosan, and cellulose as alternative bioplastic bases due to their abundance, biocompatibility, and biodegradability. These substances can form flexible films when combined with plasticizers like glycerin, offering an opportunity to develop environmentally benign materials through low-energy, small-scale fabrication. Despite this progress, systematic investigations into the synergistic interactions of these natural components remain limited, particularly regarding how their compositional ratios influence flexibility, solubility, and degradation behavior.

This study addresses that gap by developing and characterizing a bioplastic synthesized from agar, gelatin, and glycerin, using a straightforward thermal casting method that requires no specialized industrial equipment. The resulting material is designed to be fully biodegradable, non-toxic, and economically viable, making it suitable for educational, packaging, and eco-design applications. Furthermore, this work evaluates the mechanical flexibility, water solubility, and biodegradation profile of the bioplastic under natural environmental conditions. The outcomes contribute to the broader pursuit of sustainable material innovation and provide a foundation for scalable, community-level bioplastic production.

LITERATURE REVIEW

The search for sustainable alternatives to petroleum-based plastics has driven extensive research into biopolymers derived from renewable resources. Over the past two decades, bioplastics have emerged as a major focus within green materials science due to their potential for biodegradability and reduced carbon footprint. According to Pilla (2011) and Klodzinska (2020), bioplastics can be broadly classified into three categories: bio-based and biodegradable (e.g., PLA, PHA), bio-based but non-biodegradable (e.g., Bio-PE, Bio-PET), and fossil-based but biodegradable (e.g., PBAT, PCL) (1). Among these, bio-based and biodegradable materials have attracted particular attention because they can decompose naturally, minimizing environmental impact.

Recent advances have emphasized the use of natural polymers such as starch, chitosan, cellulose, agar, and gelatin. These biopolymers are abundant, renewable, and compatible with various plasticizers that enhance flexibility and mechanical performance. Zhao (2019) highlighted agar's excellent film-forming ability, while Mariniello (2022) discussed the potential of gelatin-based matrices for biodegradable packaging(3,5). Glycerin, a widely used natural plasticizer, has been shown to improve elasticity and reduce brittleness in bioplastic formulations.

Despite these developments, most existing bioplastics still depend on industrial-scale production and controlled composting conditions, limiting accessibility in low-resource regions. Prior studies (Yaranal,

2018) have suggested that simplified formulations using food-grade ingredients could democratize bioplastic production. Building upon this foundation, the present research investigates a bioplastic composed of agar, gelatin, and glycerin, aiming to create a biodegradable, low-cost, and easily producible material that supports sustainable material innovation and environmental stewardship.

Plastic generation exacerbates the challenge of solid waste management. Moreover, plastics emit substantial amounts of microplastics, which infiltrate the environment and food chain, posing significant environmental risks. Katerina Synani researched (2024) compounded by their production from fossil fuels, such as crude oil and natural gas, plastics present a formidable environmental concern(20). As a result, bioplastics are an attractive alternative to fossil-based plastics since they use renewable energy sources, aim to alleviate worries about reliance on fossil fuels, and are biodegradable, further enhancing their environmental appeal. Along similar lines, the utilization of food waste to produce bioplastics is attracting international interest.

Bio-based plastics have been identified as a promising alternative to conventional plastics with regards to finite fossil resources and climate change. With emerging novel bio-based plastics and 70% of its market share in short life cycle packaging applications, the end-of-life options (recycling, anaerobic and aerobic digestion, energy recovery etc.) as well as the resource circulation have been moved into the spotlight and have to be assessed. This paper will provide an insight into the bio-based plastics in the context of circular economy and gives an overview on its status and potential future development. Sebastian Spierling (2018) focused is set on the assessment of the potential environmental impacts of the different end-of-life options and resource circulation of bio-based plastics with the help of life cycle assessment(19).

MATERIALS AND METHODS

Materials

The primary components used in this study were agar agar (food-grade, Meron, Thailand), gelatin (type A, 240 Bloom, derived from porcine skin), and glycerin (analytical grade, 99.5% purity)(Figure 1). All materials were selected for their biodegradability, non-toxicity, and wide commercial availability. Distilled water was used as the solvent in all formulations.



Figure1. Preparation of bioplastic samples

The bioplastic films were produced through a solution casting method. A mixture containing 2% agar and 3% gelatin (w/v) was dissolved in 100 mL of distilled water under continuous stirring and

gentle heating at 90°C for 15 minutes to ensure complete dissolution (Figure 2). Once homogeneous, 1.5 mL of glycerin was added as a plasticizer to enhance flexibility. The mixture was then stirred for an additional 5 minutes to achieve uniform dispersion.

The resulting viscous solution was poured into a flat acrylic mold (20×20 cm) and allowed to cool to room temperature. Afterward, the samples were dried in a ventilated oven at 45°C for 48 hours until complete film formation. The dried bioplastics were carefully peeled off and stored in a desiccator at 25°C for further analysis.



Figure 2. Process of mixing

Characterization of Bioplastic

To evaluate the properties of the produced bioplastic, several tests were conducted:

- Thickness Measurement: Average film thickness was determined using a digital micrometer (± 0.01 mm accuracy) by measuring five random points per sample.
- Tensile Strength and Elongation: Mechanical properties were assessed using a universal testing machine (UTM) at a crosshead speed of 5 mm/min following ASTM D882 standards.
- Water Solubility and Absorption: Samples (2×2 cm) were immersed in distilled water for 24 hours at room temperature to assess solubility percentage and water uptake.
- Biodegradability Test: Soil burial tests were conducted for 8 weeks under controlled moisture conditions, monitoring mass loss at 2-week intervals.
- Visual and Structural Analysis: Surface uniformity and transparency were visually inspected and photographed under consistent light conditions.

Data Analysis

All experiments were performed in triplicate. Results were expressed as mean $\pm$ standard deviation, and data were analyzed using basic statistical methods to determine consistency and reproducibility.

RESULTS AND DISCUSSION

Physical Appearance and Film Formation

The prepared agar–gelatin–glycerin bioplastic films were transparent, flexible, and uniform in texture, indicating successful blending and plasticization. The surface exhibited smoothness without visible cracks or air bubbles, demonstrating good film-forming properties. The glycerin content was found to be optimal at 1.5 mL; lower concentrations resulted in brittleness, whereas higher amounts produced tacky films due to excessive moisture retention. The overall visual characteristics confirm the compatibility and synergistic interaction between agar and gelatin in the polymer network.

Thickness and Mechanical Properties

The film thickness ranged between 0.35–0.45 mm, ensuring consistent sample formation. The average tensile strength was measured at 16.8 ± 0.5 MPa, while elongation at break reached $24 \pm 1.2\%$, values comparable to previously reported agar–gelatin composites (Zhao et al., 2019). The mechanical results indicate that the bioplastic exhibits an optimal balance between strength and flexibility, attributed to hydrogen bonding between agar and gelatin molecules, stabilized by glycerin's plasticizing effect. Such mechanical stability highlights the potential of this formulation for packaging and single-use material applications.

Water Solubility and Absorption

Water absorption and solubility tests revealed a moderate hydrophilicity, with samples absorbing 32–36% of their mass after 24 hours of immersion. Complete dissolution was not observed, confirming that the material maintains its integrity under short-term contact with moisture. The partial solubility aligns with the hydrophilic nature of gelatin and agar, which facilitates biodegradation while preserving structural performance in low-humidity environments. This characteristic makes the bioplastic suitable for temporary-use or controlled-degradation applications.

Biodegradability Analysis

The soil burial tests showed that the bioplastic samples exhibited progressive mass loss over time, with approximately 55% degradation after 4 weeks and complete decomposition within 8 weeks. The degradation process was primarily driven by microbial activity and moisture interaction, consistent with natural polymer behavior. The results validate that the produced material is fully biodegradable under ambient soil conditions, unlike synthetic plastics which may persist for decades. This demonstrates the environmental advantage of the agar–gelatin–glycerin formulation in waste reduction and sustainable disposal.

Comparative Assessment and Sustainability

Compared to commercial bioplastics such as PLA and PHA, the developed composite offers simpler synthesis, lower production cost, and full biodegradability without requiring industrial composting. The absence of toxic by-products and reliance on food-grade, renewable ingredients make it a viable alternative for small-scale and educational production. The study supports the concept of localized bioplastic fabrication as a low-barrier approach to sustainable materials innovation, contributing to circular economy goals and eco-conscious consumer practices.

REFERENCES

- Pilla, S. (2011). Engineering applications of bioplastics and biocomposites-An overview. *Handbook of bioplastics and biocomposites engineering applications*, 1-15.
- Joo, S. H. (Ed.). (2022). *Assessing the Effects of Emerging Plastics on the Environment and Public Health*. IGI Global..
- Ju, J., & Zhao, F. (Eds.). (2025). *Edible Film and Coatings: Innovative Applications for Packaging and Food Preservation*. CRC Press.
- Hollingworth, C. S. (2010). Food hydrocolloids: characteristics, properties and structures. (No Title).
- Porta, R., Di Pierro, P., Sorrentino, A., & Mariniello, L. (2011). Promising perspectives for transglutaminase in “bioplastics” production. *J Biotechnol Biomaterial*, 1, 1-4.
- Lopez Rodriguez, A. (2023). Optimization of Algae-Based Bioplastics: Exploring Agar and Carrageenan Blends for Sustainable Applications in the Design Industry.

- Spyridoula Gerassimidou, Olwenn V Martin, Stephen P Chapman, John N Hahladakis, Eleni Iacovidou (2021). *Journal of Cleaner Production* 286, 125378
- Simone Blanc, Stefano Massaglia, Filippo Brun, Cristiana Peano, Angela Mosso, Nicole Roberta Giuggioli.(2019).*Sustainability* 11 (9), 2475
- Sarah Kakadellis, Zoe M Harris(2020).*Journal of Cleaner Production* 274, 122831
- Taofeeq D Moshood, Gusman Nawanir, Fatimah Mahmud, Fazeeda Mohamad, Mohd Hanafiah Ahmad, Airin AbdulGhani(2022).*Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 5, 100273
- Samiris Cocco Teixeira, Taila Veloso de Oliveira, Nilda de Fatima Ferreira Soares, Paulo A Raymundo-Pereira(2025).*Food Chemistry* 470, 142652
- Ahmed M Elgarahy, AK Priya, Hamida Y Mostafa, EG Zaki, SM Elsaheed, M Muruganandam, Khalid Z Elwakeel(2023).*Journal of Environmental Chemical Engineering* 11 (5), 110993
- Naseeba Parveen, SV Chinna Swami Naik, Kumar Raja Vanapalli, Hari Bhakta Sharma(2024).*Science of the Total Environment* 945, 173893
- Macarena Beltran, Benny Tjahjono, Anna Bogush, Jorge Julião, Evandro LS Teixeira(2021).*Sustainability* 13 (7), 3896
- Xiaoying Zhao, Katrina Cornish, Yael Vodovotz(2020).*Environmental science & technology* 54 (8), 4712-4732
- Zita Markevičiūtė, Visvaldas Varžinskas(2022).*Sustainability* 14 (10), 6366
- Jaakko Siltaloppi, Markus Jähi(2021).*Journal of Cleaner Production* 315, 128113
- Kushi Yadav, Ganesh Chandrakant Nikalje(2024)*PeerJ* 12, e18013
- Sebastian Spierling, Carolin Röttger, Venkateshwaran Venkatachalam, Marina Mudersbach, Christoph Herrmann, Hans-Josef Endres(2018).*Procedia CIRP* 69, 573-578
- Katerina Synani, Konstadinos Abeliotis, Kelly Velonia, Angeliki Maragkaki, Thrassyvoulos Manios, Katia Lasaridi(2024).*Sustainability* 16 (13), 5529

**Kahramanmaraş Doğal Florasından Toplanan Çemen (*Trigonella foenum-graecum* L.)
Genotiplerinin Ot Verimiyle İlişkili Bazı Bitkisel Özellikleri**

Mehmet Fatih YILMAZ

Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Malatya, Türkiye
<https://orcid.org/0000-0003-2051-6285>

Mahmut KAPLAN *

Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Kayseri, Türkiye
<https://orcid.org/0000-0002-6717-4115>

Abdullah Yasin DALKILIÇ

Doğu Akdeniz Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Kahramanmaraş,
Türkiye

* Sorumlu yazar / Corresponding author: mehmet.yilmaz@ozal.edu.tr

Özet

Bu çalışma, Kahramanmaraş doğal florasından toplanan çemen (*Trigonella foenum-graecum* L.) genotiplerinin ot verimiyle ilişkili bazı bitkisel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yürütülmüştür. Materyal olarak, farklı lokasyonlardan toplanarak tohumları çoğaltılan ve tarla koşullarında değerlendirilen 9 çemen genotipi (A64, B26, B39, B50, B52, B54, C03, C12, C25) kullanılmıştır. Deneme, Doğu Akdeniz Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü arazisinde 2018 yılında kurulmuş; her genotipte 10 bitki üzerinden morfolojik, fenolojik ve tarımsal karakterler ölçülmüş ve veriler tanımlayıcı istatistiklerle değerlendirilmiştir. Genotiplerde bitki boyu 41.20-55.20 cm, yan dal sayısı 1.40-4.80 adet, sap kalınlığı 2.80-4.72 mm, yaprakçık sayısı 31.20-124.80 adet, çiçek sayısı 8.10-24.00 adet, baklada tohum sayısı 7.80-12.00 adet, bin tane ağırlığı 21.66-30.78 g ve çimlenme oranı %79.25-89.25 arasında değişim göstermiştir. Çiçeklenme süresi 84-86 gün, tohum olgunlaşma süresi ise 124-126 gün olarak belirlenmiş; genotipler fenolojik yönden birbirine yakın seyretmiştir. Ot verimini belirleyen bitki boyu, yan dal sayısı ve yaprak özellikleri bakımından genotipler arasında belirgin bir varyasyon bulunmuştur; özellikle B50, B39, A64 ve B26 genotipleri ot verimi potansiyeli açısından ümitvar bulunmuştur. Bu genotipler gelecekte yapılacak yem bitkisi ıslah çalışmalarında genetik kaynak olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Çemen, genetik kaynak, morfolojik karakter, ot verimi, karakterizasyon

Some Botanical Characteristics Associated with Herbage Yield of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) Genotypes Collected from Kahramanmaraş Natural Flora

Abstract

This study was conducted to determine some botanical characteristics associated with the herbage yield of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) genotypes collected from the natural flora of Kahramanmaraş. Nine fenugreek genotypes (A64, B26, B39, B50, B52, B54, C03, C12, and C25), which were collected from different locations, multiplied for seed, and evaluated under field conditions, were used as plant material. The experiment was established in 2018 at the research fields of the East Mediterranean Transitional Zone Agricultural Research Institute; morphological, phenological, and agronomic characters were measured on 10 plants for each genotype, and the data were evaluated using descriptive statistics. In the genotypes, plant height ranged from 41.20 to 55.20 cm, the number of lateral branches from 1.40 to 4.80, stem thickness from 2.80 to 4.72 mm, the number of leaflets from 31.20 to 124.80, the number of flowers from 8.10 to 24.00, the number of seeds per pod from 7.80 to 12.00, thousand-seed weight from 21.66 to 30.78 g, and germination rate from 79.25% to 89.25%. The days to flowering was determined as 84–86 days, while the days to seed maturity was 124–126 days; the genotypes performed closely to each other in terms of phenological traits. A distinct variation was found among the genotypes regarding plant height, number of lateral branches, and leaf characteristics that determine herbage yield; particularly genotypes B50, B39, A64, and B26 were found promising in terms of herbage yield potential. These genotypes can be evaluated as genetic resources in future forage crop breeding programs.

Keywords: Fenugreek, genetic resource, morphological character, herbage yield, characterization

Giriş

Yem bitkileri sürdürülebilir hayvancılık üretiminin gereksinim duyduğu yüksek kaliteli kaba yemin başlıca kaynağıdır. Bu grup içerisinde baklagil yem bitkileri, yüksek ham protein içeriği ve kök nodülleri aracılığıyla gerçekleştirdikleri simbiyotik azot fiksasyonu sayesinde hem hayvan beslenmesine hem de toprak verimliliğine katkı sağlamaları bakımından ayrı bir öneme sahiptir. Bu özellikleri, baklagilleri düşük girdili ve sürdürülebilir üretim sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşeni hâline getirmektedir (Liu vd., 2025).

Çemen (*Trigonella foenum-graecum* L.), Fabaceae familyasına ait, ağırlıklı olarak Akdeniz Havzası ve Batı Asya’da yetişen, tek yıllık bir baklagil yem bitkisidir. Kısa büyüme mevsimi, kuraklığa dayanıklılığı ve geniş uyum yeteneği onu kurak ve yarı kurak bölgeler başta olmak üzere çeşitli ekolojik koşullar için elverişli kılmaktadır. Kök nodülleri yoluyla atmosferik azotu bağlaması, bitkiyi toprak verimliliğine katkı sağlayan ve ürün münavebe sistemlerinde değer taşıyan bir tür konumuna getirmektedir (Choudhary vd., 2024; Zandi vd., 2014).

Yem değeri yönünden çemen, yüksek ham protein içeriği, iyi sindirilebilirliği ve zengin mineral profiliyle hem küçükbaş hem de büyükbaş hayvanlar için nitelikli bir kaba yem kaynağıdır ve yeşil ya da kuru ot olarak kullanılabilir. Yem bitkisi olmasının yanı sıra tohumlarının içerdiği biyoaktif bileşikler nedeniyle baharat, ilaç ve gıda sektörlerinde de yer bulan çok amaçlı bir bitkidir (Aasim vd., 2018; Choudhary vd., 2024; Tewari vd., 2024).

Dünya genelindeki çemen popülasyonları arasında bitki boyu, biyokütle ve tohum özellikleri gibi karakterler bakımından önemli düzeyde fenotipik ve genetik varyasyon bulunmaktadır. Bu varyasyon, verim, stres toleransı ve kalite yönünden gelişmiş çeşitlerin elde edilmesine yönelik ıslah çalışmaları için değerli bir potansiyel sunmakta; özellikle doğal floradan toplanan yerel genotipler önemli birer genetik kaynak olarak öne çıkmaktadır (McCormick vd., 2009; Verma vd., 2025).

Yem verimini artırmayı hedefleyen ıslah programlarında, verimle güçlü ilişki gösteren morfolojik özelliklerin belirlenmesi etkili seleksiyonun temelini oluşturmaktadır. Bitki boyu, dal sayısı, sap kalınlığı ve yaprakla ilgili özellikler gibi karakterler yem verimini doğrudan ya da dolaylı olarak etkilemekte; çoğu zaman orta-yüksek kalıtım derecesi ve verimle olumlu ilişki göstermeleri nedeniyle dolaylı ve erken seleksiyon ölçütü olarak kullanılabilir. Nitekim farklı yem bitkisi türlerinde bu morfolojik karakterlerin verim tahmininde ve genotip seçiminde başarıyla kullanıldığı bildirilmiştir (Araghi vd., 2013; Casler ve Hovin, 1985; Pirnajmedin vd., 2022; Saroj vd., 2021).

Literatürde çemen üzerine yürütülen çalışmaların önemli bölümü tohum verimi, sabit yağ oranı, fenolik bileşikler ve tıbbi özellikler üzerinde yoğunlaşmış olup, doğal floradan toplanan yerel genotiplerin yem amacıyla değerlendirilmesine yönelik araştırmalar sınırlı kalmıştır. Özellikle Türkiye'nin doğal florasında yer alan çemen genotiplerinde ot verimiyle ilişkili morfolojik özelliklerin ortaya konulmasına yönelik çalışmaların yetersizliği, yerel genetik kaynakların yem bitkisi ıslahında değerlendirilmesi açısından önemli bir bilgi boşluğu oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Kahramanmaraş doğal florasından toplanan farklı çemen genotiplerinin ot verimini etkileyen bazı bitkisel özelliklerinin belirlenmesi ve üstün özellik gösteren genotiplerin ıslah programlarında kullanılacak genetik materyal olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmanın materyalini, Kahramanmaraş doğal florasında yürütülen survey ve toplama çalışmaları (2014-2018) sırasında farklı lokasyonlardan toplanan ve tohumları Doğu Akdeniz Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü’nde çoğaltılan çemen (*Trigonella foenum-graecum* L.) genotipleri oluşturmuştur. Değerlendirmeye tarla koşullarında ölçüm ve gözlem yapılabilecek düzeyde çoğaltılabilen 9 çemen genotipi (A64, B26, B39, B50, B52, B54, C03, C12, C25) alınmıştır.

Tohum çoğaltma ve tarla gözlemleri, Kahramanmaraş Merkez ilçesinde, yaklaşık 37° 38' kuzey enlemi ve 36° 37' doğu boyları arasında, ortalama 568 m rakımlı enstitü arazisinde yürütülmüştür. Bölgede Akdeniz iklimi hâkim olup kışlar ılık ve yağışlı, yazlar ise sıcak ve kurak geçmektedir. Deneme toprakları killi-tınlı bünyeye sahip, hafif alkali (pH 7.84), tuzsuz, kireç oranı yüksek, organik madde bakımından fakir ve yarayışlı fosfor bakımından fakir yapıda olup, kireç oranı yüksek ve organik madde bakımından fakirdir.

Doğadan toplanan tohumlar önce saksılarda çoğaltılmış, elde edilen tohumlar da tarla koşullarında sıralara ekilmiştir. Ekim 2018 yılı Ocak ayı ortasında yapılmış; iyi bir tohum yatağı hazırlanarak diamonyum fosfat (18-46-0) gübresinden 5 kg/da N ve 12 kg/da P₂O₅ sıralara homojen biçimde uygulanmıştır. Ölçüm ve gözlemler Mart ayında başlamış, hasat Haziran-Temmuz döneminde tamamlanmış; her genotipte her sıradan 10 bitki üzerinden değerlendirme yapılmıştır (Tokluoğlu, 1979; Sağsöz, 1995).

Genotiplerde incelenen özellikler: morfolojik karakterler [bitki boyu (cm), yan dal sayısı (adet), sap kalınlığı (mm), yaprakçık boyu ve eni (cm), yaprakçık sayısı (adet), çiçek sayısı (adet), bakla boyu ve eni (cm), baklada tohum sayısı (adet)], fenolojik gözlemler [çiçeklenme süresi ve tohum olgunlaşma süresi (gün)] ve tarımsal karakterler [bin tane ağırlığı (g) ve çimlenme oranı (%)]. Elde edilen veriler, ortalama, en düşük (min), en yüksek (max) ve standart sapma değerleri hesaplanarak tanımlayıcı istatistiklerle değerlendirilmiştir.

Bulgular

İncelenen 9 çemen genotipine ait morfolojik ve tarımsal özelliklere ilişkin ortalama, en düşük (min), en yüksek (maks) ve standart sapma (ss) değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü gibi, bitki boyu 41.20 cm (C25) ile 55,20 cm (B50) arasında değişmiş; en uzun boylu genotipler B50, B39 (54.80 cm) ve A64 (50.80 cm) olmuştur. Sap kalınlığı 2.80 mm (B26, B54) ile 4.72 mm (C12), yandal sayısı ise 1.40 adet (B52, C25) ile 4.80 adet (B50) arasında belirlenmiştir. Çiçek sayısı ise 8.10 adet (B54) ile 24.00 adet (C12, C25) arasında değişim göstermiştir.

Yaprak özellikleri bakımından yaprakçık boyu 2.30-2.94 cm, yaprakçık eni 0.84-2.10 cm arasında değişmiştir. Yaprakçık sayısı en geniş varyasyonu gösteren özellik olup 31.20 adet (B54) ile 124.80 adet (A64) arasında değişmiştir. Çimlenme oranı %79.25 (B50) ile %89.25 (A64) arasında bulunmuş, tüm genotipler tarımsal açıdan yeterli çimlenme performansı göstermiştir.

Generatif ve tohum özellikleri bakımından bakla boyu 7.18 cm (B50) ile 15.80 cm (A64), bakla eni 0.34 cm (B39) ile 0.53 cm (B52, C03), baklada tohum sayısı 7.80 adet (C25) ile 12.00 adet (B39) arasında değişmiştir. Bin tane ağırlığı ise 21.66 g (B39) ile 30,78 g (B50) arasında belirlenmiştir.

Fenolojik gözlemlerde çiçeklenme süresi 84-86 gün, tohum olgunlaşma süresi ise 124-126 gün arasında gerçekleşmiş; genotipler bu özellikler bakımından birbirine oldukça yakın bulunmuştur.

Tablo 1. Çemen genotiplerinin bazı morfolojik özelliklerine ait değerler

Pop. No.	Bitki boyu (cm)				Sap kalınlığı (mm)				Yan dal sayısı (adet)				Çiçek sayısı (adet)			
	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S
A64	50.80	39.00	58.00	6.84	4.12	3.80	4.50	0.24	2.00	1.00	3.00	0.67	18.50	15.00	21.00	2.01
B26	50.40	45.00	55.00	3.92	2.80	2.60	3.00	0.15	3.00	2.00	4.00	0.67	14.10	11.00	18.00	2.56
B39	54.80	49.00	62.00	5.14	3.80	3.60	4.00	0.15	1.60	1.00	3.00	0.84	8.30	5.00	14.00	2.95
B50	55.20	50.00	61.00	4.39	3.42	3.20	3.60	0.15	4.80	4.00	6.00	0.79	20.90	18.00	24.00	2.33
B52	49.00	39.00	57.00	7.09	3.08	2.80	3.30	0.18	1.40	1.00	2.00	0.52	16.40	13.00	23.00	3.17
B54	46.60	39.00	51.00	4.35	2.80	2.60	3.00	0.15	2.00	1.00	3.00	0.67	8.10	5.00	11.00	2.28
C03	41.40	35.00	49.00	5.10	4.12	3.90	4.40	0.18	2.80	2.00	4.00	0.79	18.00	15.00	21.00	2.45
C12	46.00	40.00	53.00	5.29	4.72	4.60	4.90	0.12	2.20	1.00	4.00	1.03	24.00	21.00	27.00	2.40
C25	41.20	29.00	48.00	7.41	4.34	4.00	4.60	0.23	1.40	1.00	2.00	0.52	24.00	21.00	27.00	2.16

Pop. No.	Yaprakçık boyu (cm)				Yaprakçık eni (cm)				Yaprakçık sayısı (adet)				Çimlenme testi (%)			
	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S
A64	2.94	2.50	3.30	0.32	0.84	0.75	0.95	0.08	124.80	120.00	130.00	4.34	89.25	79.00	99.00	8.66
B26	2.62	2.50	2.80	0.12	1.40	1.35	1.45	0.04	52.40	50.00	54.00	1.58	84.50	80.00	88.00	3.70
B39	2.62	2.40	2.90	0.21	1.11	1.00	1.20	0.07	36.00	30.00	40.00	3.13	85.00	82.00	92.00	4.76
B50	2.78	2.20	3.10	0.32	1.13	1.00	1.20	0.07	96.50	90.00	104.00	5.44	79.25	74.00	88.00	6.18
B52	2.88	2.50	3.20	0.27	1.12	1.00	1.19	0.07	36.90	30.00	42.00	3.96	86.75	82.00	94.00	5.85
B54	2.30	2.10	2.50	0.15	1.32	1.20	1.40	0.07	31.20	28.00	38.00	3.01	86.00	78.00	94.00	6.73
C03	2.40	2.20	2.60	0.15	1.84	1.70	1.98	0.10	50.50	48.00	54.00	2.37	80.25	69.00	88.00	8.66
C12	2.76	2.60	2.90	0.11	2.10	1.95	2.20	0.09	53.30	50.00	56.00	2.11	82.00	78.00	90.00	5.66
C25	2.82	2.50	3.10	0.20	1.35	1.23	1.40	0.07	67.10	64.00	73.00	2.77	82.50	79.00	90.00	5.07

Pop. No.	Meyve (bakla) boyu (cm)				Meyve (bakla) eni (cm)				Meyvede (baklada) tohum sayısı (adet)				Bin tane ağırlığı (g)			
	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S	Ort.	Min.	Mak.	S.S
A64	15.80	14.50	17.00	0.98	0.37	0.33	0.40	0.03	8.00	6.00	9.00	1.15	23.20	20.15	26.10	2.53
B26	8.88	8.60	9.10	0.18	0.45	0.40	0.50	0.03	10.00	7.00	12.00	1.49	26.01	24.18	29.40	2.46
B39	12.32	11.50	13.00	0.55	0.34	0.28	0.40	0.04	12.00	11.00	14.00	1.05	21.66	21.16	22.19	0.44
B50	7.18	6.50	7.70	0.44	0.43	0.39	0.48	0.03	8.00	7.00	10.00	1.05	30.78	28.12	35.20	3.07
B52	11.50	10.50	12.50	0.75	0.53	0.48	0.60	0.04	10.00	8.00	12.00	1.33	27.11	25.47	29.71	1.86
B54	10.00	9.50	10.50	0.34	0.43	0.35	0.50	0.06	8.10	6.00	9.00	0.99	28.27	26.23	31.10	2.06
C03	9.96	9.00	10.70	0.67	0.53	0.48	0.58	0.04	9.80	8.00	11.00	1.03	27.17	25.58	29.15	1.49
C12	14.30	13.80	15.00	0.44	0.51	0.46	0.55	0.03	11.90	10.00	14.00	1.29	24.22	22.40	26.47	1.72
C25	10.24	9.50	11.00	0.53	0.38	0.35	0.40	0.02	7.80	6.00	9.00	1.03	23.42	20.19	28.90	3.91

Tartışma

Bu çalışmada, Kahramanmaraş doğal florasından toplanan çemen (*Trigonella foenum-graecum* L.) genotipleri arasında incelenen morfolojik, fenolojik ve tarımsal özellikler bakımından önemli düzeyde varyasyon belirlenmiştir. Özellikle bitki boyu (41.20-55.20 cm), yan dal sayısı (1.40-4.80 adet) ve yaprakçık sayısında (31.20-124.80 adet) gözlenen geniş değişim aralıkları, doğal popülasyonların zengin bir genetik çeşitlilik kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır. Doğal floradan elde edilen materyalde bu düzeyde bir varyasyonun ortaya çıkması, farklı çevre koşulları altında uzun yıllar süren doğal seleksiyonun bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Söz konusu çeşitlilik, çemenin yem amaçlı ıslahında yararlanılabilecek önemli bir potansiyele işaret etmektedir.

Bitki boyu, biyokütle üretimi ve ot verimiyle yakından ilişkili en önemli morfolojik özelliklerden biridir. Çalışmamızda bitki boyu 41.20-55.20 cm arasında değişmiş, en yüksek değerler B50 ve B39 genotiplerinde belirlenmiştir. Farklı coğrafi kökenlere ait çemen popülasyonlarında yürütülen çalışmalar da bitki boyu bakımından önemli fenotipik ve genotipik varyasyon bulunduğunu, bu özelliğin yüksek genotipik (GCV) ve fenotipik varyasyon katsayısı (PCV) ile kuru madde veriminin belirleyicisi olduğunu bildirmiştir (Panwar vd., 2018; Verma vd., 2025). Ayrıca bitki boyunun bazı popülasyonlarda yüksek kalıtım derecesi göstermesi, bu özelliğe dayalı seçimin etkili ve güvenilir olabileceğini düşündürmektedir (Meena vd., 2019). Bu bağlamda, çalışmamızda öne çıkan uzun boylu genotipler, ot verimini artırmaya yönelik seleksiyon çalışmaları için umut verici bulunmuştur. Yan dal sayısı da genotipler arasında geniş bir varyasyon göstermiş (1.40-4.80 adet) ve en yüksek değer B50 genotipinde saptanmıştır. Dallanmanın artması, fotosentetik yüzey alanını ve yaprak üretimini artırarak toplam ot verimine olumlu katkı sağlamaktadır. Çemende bitki başına dal sayısının hem önemli değişkenlik gösterdiği hem de biyokütle ve tohum verimiyle olumlu ilişkili olduğu, dolayısıyla etkili bir dolaylı seçim ölçütü olarak kullanılabileceği bildirilmiştir (Mohanalakshmi vd., 2025; Roba vd., 2022). Dallanma özelliklerinin yüksek kalıtım derecesi ve beklenen genetik ilerlemesi, bu özelliğin ıslah programlarındaki değerini desteklemektedir (Shekhawat vd., 2022).

Yaprakçık sayısında gözlenen geniş varyasyon (31.20–124.80 adet; en yüksek A64 genotipinde), yem kalitesi ve kuru madde üretimi bakımından önemli farklılıklara işaret etmektedir. Yapraklar gövdeye kıyasla daha yüksek ham protein ve daha düşük ham selüloz içerdiğinden, yaprak/gövde oranının artması otun besleme değerini yükseltmektedir. Çemende yaprak özellikleri üzerine çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, yaprak sayısı ve yaprak alanına ilişkin özelliklerin orta-yüksek kalıtım derecesine sahip olduğu ve biyolojik verim ile kalite parametreleriyle olumlu ilişki gösterdiği rapor edilmiştir (Meena vd., 2025; Verma vd., 2025). Yaprakçık boyu (2.30-2.94 cm) ve eninde (0.84-2.10 cm) belirlenen farklılıklar da genotipler arasındaki yaprak gelişimi çeşitliliğini yansıtmaktadır.

Generatif özellikler bakımından çiçek sayısı (8.10-24.00 adet), bakla boyu (7.18-15.80 cm), bakla eni (0.34-0.53 cm) ve baklada tohum sayısında (7.80-12.00 adet) belirlenen değişkenlik, genotipler arasında üreme kapasitesi yönünden önemli farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, vejetatif büyüme ile generatif gelişim arasındaki kaynak paylaşımının genotipe göre değiştiğine ve birçok baklagilde görülen yem-tohum üretimi dengesiyle uyumlu olduğuna işaret etmektedir (McCormick vd., 2008; Verma vd., 2025). Tohum verimi ile ot veriminin en azından kısmen farklı genetik faktörlerce yönetilmesi, ıslah hedefine göre seçim stratejisinin buna uygun biçimde kurgulanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çiçeklenme (84-86 gün) ve tohum olgunlaşma süresi (124-126 gün) gibi fenolojik özellikler, genotipler arasında oldukça düşük değişkenlik göstermiştir. Bu fenolojik yeknesaklık, aynı coğrafi bölgeden toplanan materyalde uzun süre etkili olan doğal seleksiyonun bir sonucu olarak, benzer ve senkronize gelişim gösteren genotiplerin ortaya çıkmasıyla açıklanabilir. Fenolojik açıdan bu tekdüzelik, genetik olarak çeşitli materyalde tek tip hasat zamanının planlanmasını kolaylaştırdığından ıslah ve üretim açısından avantaj sağlamaktadır (McCormick vd., 2009; Meena vd., 2025).

Bin tane ağırlığı bakımından incelenen genotipler 21.66-30.78 g arasında değerler almış ve Tokbay Özcan ve Arabacı (2011) tarafından bildirilen değerlerden daha yüksek bulunmuştur; bu durum materyalde iri taneli genotiplerin yaygınlığını göstermektedir. Tohum iriliği, fide çıkışı ve fide gücü ile olumlu ilişkili önemli bir tarımsal özelliktir. Bununla birlikte, yüksek bin tane ağırlığının mutlaka yüksek ot verimi anlamına gelmediği; tohum verimi ile ot veriminin kısmen farklı genetik faktörler tarafından belirlendiği göz önünde bulundurulmalıdır.

(McCormick vd., 2008; Meena vd., 2015). Dolayısıyla ıslah çalışmalarında, üretim hedefine bağlı olarak tohum ve ot özelliklerine yönelik seçimin dengelenmesi gerekmektedir.

Farklı coğrafi kökenlere ait çemen genotiplerinin morfolojik profillerine göre belirgin gruplar oluşturduğu ve bu çeşitliliğin seleksiyon ile melezleme çalışmaları için değerli materyal sunduğu çeşitli araştırmalarda vurgulanmıştır (Çamlıca ve Yıldız, 2019; Meena vd., 2025). Çalışmamızda doğal floradan toplanan genotipler arasında belirlenen geniş morfolojik varyasyon da, bu materyalin benzer bir genetik çeşitlilik barındırdığını ve yem bitkisi ıslahında değerlendirilebileceğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, Kahramanmaraş'ın doğal florasından toplanan çemen genotipleri önemli düzeyde genetik çeşitlilik içermektedir. Özellikle B50, A64, B39 ve B26 genotipleri; bitki boyu, dallanma kapasitesi ve yaprak özellikleri bakımından öne çıkmış ve gelecekte yürütülecek yem amaçlı çemen ıslah programlarında ebeveyn materyali olarak değerlendirilebilecek potansiyel göstermiştir. Elde edilen bulgular, Türkiye'nin doğal florasında yer alan yerel çemen popülasyonlarının korunması ve karakterizasyonunun, yem bitkileri genetik kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı açısından taşıdığı önemi ortaya koymaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Kahramanmaraş doğal florasından toplanan çemen genotiplerinin ot verimiyle ilişkili bitkisel özellikleri bakımından zengin bir varyasyon gösterdiği belirlenmiştir. Ot verimini doğrudan etkileyen bitki boyu, yan dal sayısı, yaprakçık sayısı ve yaprak boyutları gibi karakterlerde genotipler arasında önemli farklılıklar saptanmıştır. Bu varyasyon, doğal floradan toplanan materyalin ıslah çalışmaları için değerli bir genetik kaynak oluşturduğunu göstermektedir.

Bitki boyu, dallanma ve yaprak özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, B50, B39, A64 ve B26 genotipleri ot verimi potansiyeli açısından öne çıkmıştır. Bu genotipler, yem amaçlı çemen ıslahında ebeveyn hattı olarak ya da seleksiyon çalışmalarında başlangıç materyali olarak kullanılabilir. Ayrıca genotiplerin fenolojik yönden yeknesak (çiçeklenme 84-86 gün, olgunlaşma 124-126 gün) bir yapı göstermesi, bölge koşullarına uyum ve hasat zamanının planlanması açısından avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada elde edilen veriler morfolojik, fenolojik ve tarımsal karakterlere dayanmakta olup, bitkilerin ot verimi potansiyeli bu özellikler üzerinden dolaylı olarak değerlendirilmiştir. Öne çıkan genotiplerin gerçek yem verimi performanslarının ortaya konulabilmesi için, tekerrürlü tarla denemeleri kurularak yeşil ot verimi, kuru ot verimi, kuru madde oranı ve ham protein gibi kalite ve verim parametrelerinin doğrudan ölçüldüğü ileri araştırmaların yürütülmesi önerilmektedir. Bu genotiplerin farklı ekolojik koşullarda denenmesi, adaptasyon yeteneklerinin ve verim stabiliteilerinin belirlenmesi açısından da yararlı olacaktır.

Teşekkür

TAGEM/TBAD/14/A01/P01/008 proje numaralı bu çalışma, Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM) tarafından desteklenmiştir. Proje ekibinde yer alarak çalışmalarda önemli bir paya sahip olan ve 30.01.2025 tarihinde vefat eden Doç. Dr. Rukiye KARA'yı rahmet ve minnetle yad ederiz. Yazarlar, çalışmanın gerçekleştirilmesine sağladığı katkı ve destek için Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü'ne (TAGEM) teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- Aasim, M., Baloch, F.S., Nadeem, M.A., Bakhsh, A., Sameeullah, M., Day, S. (2018). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.): An Underutilized Edible Plant of Modern World. In: Ozturk, M., Hakeem, K., Ashraf, M., Ahmad, M. (eds) Global Perspectives on Underutilized Crops. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77776-4_12
- Araghi, B., Barati, M., Majidi, M. M., & Mirlohi, A. (2013). Application of half-sib mating for genetic analysis of forage yield and related traits in *Bromus inermis*. *Euphytica*, 196(1), 25–34. <https://doi.org/10.1007/s10681-013-1011-2>

- Çamlıca, M., & Yıldız, G. (2019). Characterization of morphological and yield variation of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) genotypes. *Legume Research*, 42(4), 500–504. <https://doi.org/10.18805/LR-444>
- Casler, M. D., & Hovin, A. W. (1985). Predicting forage yield from morphological traits in reed canarygrass. *Crop Science*, 25, 783–787. <https://doi.org/10.2135/cropsci1985.0011183X0025000500014x>
- Choudhary, S., Singh, R., Ravi, Y., Gena, C. B., Singh, D., Harisha, C. B., Meena, R. S., Meena, N. K., Chauhan, V. B. S., Kavan Kumar, V., Kumari, V., & Verma, A. K. (2024). Phytotherapeutic, nutraceutical, medicinal, and forage properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.): A comprehensive review. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(10), 719–733. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i101494>
- Liu, Q., Huang, G., Zhang, Z., Lin, Q., Deng, X., Dong, X., Liu, Z., Wang, Z., Zhang, Y., Jing, H., Chong, K., & Cao, X. (2025). Forage crop research in the modern age. *Advanced Science*, 12(27), e2415631. <https://doi.org/10.1002/advs.202415631>
- Mccormick, K. M., Norton, R. M., & Eagles, H. A. (2008). Phenotypic variation within a fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) germplasm collection. II. Cultivar selection based on traits associated with seed yield. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56(5), 651–661. <https://doi.org/10.1007/s10722-008-9391-1>
- Mccormick, K. M., Norton, R. M., & Eagles, H. A. (2009). Phenotypic variation within a fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) germplasm collection. I. Description of the collection. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56(5), 639–649. <https://doi.org/10.1007/s10722-008-9398-7>
- Meena, R. S., Choudhary, S., Verma, A. K., Meena, N. K., & Mali, S. C. (2019). Estimates of genetic variability, divergence, correlation and path coefficient for morphological traits in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) genotypes. *Legume Research - An International Journal*, 44(3), 281–286. <https://doi.org/10.18805/LR-4090>
- Meena, S. K., Divakara Sastry, E. V., Rajput, S. S., & Pandey, Y. (2015). Stability of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) genotypes for terminal heat and water stress. *Legume Research* 38(5), 589-597. DOI: 10.18805/lr.v38i5.5934. <https://arccjournals.com/journal/legume-research-an-international-journal/LR-3350>
- Meena, V. S., Meena, V. K., Bhardwaj, R., Singh, K., Shekhawat, N., & Shukla, A. K. (2025). Genetic diversity and agromorphological characterization of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) germplasm provides insight for breeding and crop improvement. *Scientific Reports*, 16(1), 2324. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32066-y>
- Mohanalakshmi, M., Prabhu, M., Jegadeeswari, V., Vijayalatha, K. R., Devi Nithya, A., Venkatesan, K., & Umamaheswari, T. (2025). Variability, correlation and path coefficient analysis in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) genotypes. *Legume Research*, 48(6), 938-943. <https://doi.org/10.18805/LR-5427>
- Panwar, A., Sharma, Y. K., Meena, R. S., Solanki, R. K., Aishwath, O. P., Singh, R., & Choudhary, S. (2018). Genetic variability, association studies and genetic divergence in Indian fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) varieties. *Legume Research*, 41(6), 816–821. <https://doi.org/10.18805/LR-3803>
- Pirnajmedin, F., Majidi, M. M., Taleb, M. H., & Rostami, D. (2022). Genetic parameters and selection in full-sib families of tall fescue using best linear unbiased prediction (BLUP) analysis. *BMC Plant Biology*, 22(1), 293. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03675-w>
- Roba, R., Mohammed, W., Ruelle, M., Tana, T., & Simion, T. (2022). Diversity of Ethiopian fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) accessions based on agromorphological traits. *Advances in Agriculture*, 2022, 4844828. <https://doi.org/10.1155/2022/4844828>

- Sağsöz, S. (1995). Tohumluk bilimi. Atatürk Üniversitesi Yayınları No: 677, Ziraat Fakültesi Yayınları No: 302, 299 s.
- Saroj, R., Soumya, S. L., Singh, S., Sankar, S. M., Chaudhary, R., Yashpal, Saini, N., Vasudev, S. and Yadava, D. K. (2021) Unraveling the Relationship Between Seed Yield and Yield-Related Traits in a Diversity Panel of Brassica juncea Using Multi-Traits Mixed Model. Front. Plant Sci. 12: 651936. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.651936>
- Shekhawat, N., Meena, V. S., Singh, K., Rani, K., & Gupta, V. (2022). Studies on genetic variability, heritability and genetic advance for morphological traits in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) for arid climate of Rajasthan. Legume Research. 46(3): 312-315. <https://doi.org/10.18805/LR-5046>
- Tewari, A., Singh, R., & Brar, J. K. (2024). Pharmacological and therapeutic properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) seed: A review. The Journal of Phytopharmacology, 13(2), 97–104. <https://doi.org/10.31254/phyto.2024.13203>
- Tokbay Özcan, İ., & Arabacı, O. (2011). Farklı ekim zamanı ve sıra aralığının çemen (*Trigonella foenum-graecum* L.)'in verim ve bazı morfolojik özelliklerine etkisi. ADÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 8(1), 83–90. <https://izlik.org/JA58XN29CY>
- Tokluoğlu, M. (1979). Bazı mera bitkilerinin önemli morfolojik, biyolojik ve tarımsal karakterleri üzerinde araştırmalar. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 728, 421 s.
- Verma, P. P. S., Siddiqui, S., Singh, S., Nayyer, M. A., Kumar, D., Kumar, B., Siddiqui, M. H., & Padalia, R. C. (2025). Quantitative assessment and character association of genetic variability in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) populations from the west-central Himalayas. Industrial Crops and Products, 232, 121319. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121319>
- Zandi, P., Basu, S. K., Khatibani, L. B., Balogun, M. O., Aremu, M. O., Sharma, M., Kumar, A., Sengupta, R., Li, X., Li, Y., Tashi, S., Hedi, A., & Cetzal-Ix, W. (2014). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) seed: A review of physiological and biochemical properties and their genetic improvement. Acta Physiologiae Plantarum, 37-1714(2015). <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1714-6>

Sayı : E-19561457-900-2600014614
Konu : Kongre Başkanlığı İzni

30.06.2026

DAĞITIM YERLERİNE

- İlgi : a) Prof. Dr. Tolga KARAKÖY'ün 30.06.2026 tarihli ve 903.07-2600014583 sayılı dilekçesi.
b) Dr. Öğr. Üyesi Yeter ÇİLESİZ'in 30.06.2026 tarihli ve 903.07-2600014577 sayılı dilekçesi.

İlgi sayılı yazınıza istinaden; 5-9 Temmuz 2026 tarihleri arasında Yunanistan/Rodos'ta düzenlenmesi planlanan **"ISPEC 21. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi'nin"** düzenlenme yerinin İzmir/Çeşme olarak değiştirilmesi nedeniyle, söz konusu kongreye kongre başkanı olarak katılım sağlama talebiniz Fakültemiz Dekanlığınca uygun görülmüştür.

Gereğini bilgilerinize rica ederim.

Prof. Dr. Muhammad ASIM
Dekan

Ek:

- 1- MIRAY CRUISES BİLGİLENDİRME
- 2- Kongre Başkanlığı İzni (Tarla Bitkileri)
- 3- Kongre Başkanlığı İzni (Bitki Koruma)

DAĞITIM LİSTESİ

Gereği:

Sayın Prof. Dr. Tolga KARAKÖY
Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yeter ÇİLESİZ

Bilgi:

Tarla Bitkileri Bölüm Başkanlığı
Bitki Koruma Bölüm Başkanlığı

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Belge Doğrulama Kodu: ATM3ACU

Belge Takip Adresi: <https://www.turkiye.gov.tr/sbtu-ebys>

Adres: Gültepe Mah. Mecnun Otyakmaz Cad NO:1 Merkez / SIVAS

Telefon No: (0 346) 2170000

e-Posta:

Kep Adresi: sivasbiltekuni@hs01.kep.tr

Faks No: (0 346) 2191678

İnternet Adresi: www.sivas.edu.tr

Bilgi için :

Telefon No:

Direkt Hat:

Kamil Aktaş

Teknisyen Yardımcısı

(0 346) 2170277 - 0277

