

İZMİR ISCS
2. ULUSLARARASI
FEN ve UYGULAMALI BİLİMLER
KONGRESİ
6 - 8 Mart 2026
YÜZYÜZE ve ONLINE



Issued: 28.03.2026
ISBN: 978-625-5694-90-4

www.izmirkongresi.org





**ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES
MARCH 6 – 8, 2026
IZMIR**

**Edited By
PROF. DR. HÜLYA ÇİÇEK**

**Issued: 28.03.2026
ISBN: 978-625-5694-90-4**

ASSOCIATION & ACADEMIC INCENTIVES :

**In the conference 30 papers have been presented by Turkish participants and 52 papers
by international participants.**

**Members of the organizing committees of the conference perform their duties with an
"official assignment letter"**

**The Contents Of This Book Are Solely Those Of The Authors.
Bu Kitabın içeriğinin tüm sorumluluğu yazarlarına aittir.**

Website: www.izmirkongresi.org

Contact: iscsizmir@gmail.com

CONFERENCE ID**ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES****DATE – PLACE****MARCH 6 – 8, 2026****IZMIR****ORGANIZATION****ACADEMY GLOBAL CONFERENCES & JOURNALS****EVALUATION PROCESS****All applications have undergone a double-blind peer review process.****PARTICIPATING COUNTRIES**

**Turkey – Azerbaijan – Bangladesh – Malaysia- North Macedonia – Pakistan- Egypt –
Afghanistan- Iran- Nigeria – Albania – Tunisia- Mongolia – Ethiopia- Russia- Oman –
Algeria- Saudi Arabia – Syria- Senegal – Tajikistan-**

PRESENTATION**Oral presentation**

No part of this book may be reprinted or reproduced or utilized in any form or by any electronic, mechanical or any other means, now known or hereafter invented, including photocopying and recording, or in any form of information storage or retrieval systems, without permission from the publishers.

Academy Global–2026©

CONGRESS ORGANIZING BOARD

Head of Conference : Prof. Dr. Hülya Çiçek

Prof. Dr. Hülya Çiçek - Gaziantep Üniversitesi

Prof. Dr. Ali Bilgili - Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Naile Bilgili - Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Başak Hanedan - Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Hajar Huseynova - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Prof. Dr. Dwi Sulisworo - Ahmad Dahlan University

Prof. Zain Musa - Royal Academy of Cambodia

Prof. Dr. Sameer Jain – NICMAR University

Prof Yakup Babayev - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Prof. Dr. Suyatno - Ahmad Dahlan University

Prof. Dr. Al-Rashiff H. Mastul - Mindanao State University

Prof. Dr. Alhisan U. Jemsy -Mindanao State University

Prof. Dr. Elif Akpınar Külekçi - Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Mehtap Kavurmacı - Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Belkıs Özkara - Afyon Kocatepe Üniversitesi

Prof. Dr. Mavlonova Ugiloy Khamdamovna - Zarmed University

Prof. Dr. Sevinj Seyidova - Azerbaijan State Pedagogical University

Assoc. Prof. Dr. Aysel Arslan - Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Yeliz Çakır Sahilli - Munzur Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Sıddık BAKIR - Ataturk Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Berna Koçak- Munzur Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Irade Kerimova -Azerbaycan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Dhesi Ari Astuti - Ahmad Dahlan University

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Fırat Baran - Batman Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Aydın -Dicle Üniversitesi

Assoc. Prof. Dody Hartanto -Ahmad Dahlan University

Assoc. Prof. Dr. Rungchacadaporn - Ahmad Dahlan University

Assoc Prof. Dr. Feran Aşur - Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Assoc Prof. Dr. Erkan EFİLTİ -Kırgızistan-Türkiye Manas University

Assoc. Prof. Dr. Dini Yuniarti -Ahmad Dahlan University

Assoc. Prof. Ivaylo Staykov - New Bulgarian Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Abbas Ghaffari - Tebriz Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Yasemin Taş - Gazi Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Yeganə Qəhrəmanova - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Bülent Işık - Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Nurkan Yılmaz - İnönü Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Həməzə Əliyev - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Sevrə Fırıncıoğulları –

Assist. Prof. Ihwan Ghazali - Technic University of Malaysia -

Assist. Prof. Dr. Abışov Elşad Şərəfxan oğlu - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assist. Prof. Dr. Mahrukh Dovlatzade -Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Assist. Prof. Dr. Naci Büyükkaracığan Selçuk Üniversitesi

Assist. Prof. Dr. Songül ATAĞ - Dicle Üniversitesi

Lecturer Mehmet Nuri Ödük -Selçuk Üniversitesi

Assist. Prof. Dr. Mehdi Meskini Heydarlou

Dr. Dadash Mehravari - Tebriz Üniversitesi

Dr. Aynurə Əliyeva - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

Dr. Gültekin Gürçay

Dr. Amaneh Manafidizajı

Scientific & Review Committee

Prof. Dr. Hülya Çiçek – Türkiye

Prof. Dr. Emine Koca – Türkiye

Prof. Dr. Fatma Koç – Türkiye

Prof. Dr. Valide Paşayeva - Türkiye

Prof. Dr. Ali Bilgili - Türkiye

Prof. Dr. Naile Bilgili - Türkiye

Prof. Dr. Başak Hanedan – Türkiye

Prof. Dr. Aysel Güven - Türkiye

Prof. Dr. Bülent Kurtişoğlu – Türkiye

Prof. Dr. Hajar Huseynova – Azerbaijan

Prof. Dr. Dwi Sulisworo – Indonesia

Prof. Dr. Natalia Latygina – Ukraina

Prof. Dr. Yunir Abdrahimov – Russia

Prof. Muntazir Mehdi – Pakistan

Prof. Dr. T.Venkat Narayana Rao – India

Prof. Dr. İzzet Gümüş – Türkiye

Prof. Dr. Mustafa Bayram – Türkiye

Prof. Dr. Saim Zeki Bostan – Türkiye

Prof. Dr. Hyeonjin Lee – China

Prof. Yakup Babayev - Azerbaijan

Prof. Dr. Suyatno – Indonesia

Prof. Dr. Zain Musa – Cambodia

Prof. Dr. Sameer Jain – India

Prof. Mehdi Mohammadzade – Iran

Prof. Dr. Ika Maryani – Indonesia

Prof. Dr. Guler Yenice – Türkiye

Prof. Dr. Elif Akpınar Külekçi – Türkiye

Prof. Dr. Mavlonova Ugiloy Khamdamovna – Uzbekistan

Prof. Dr. Mehtap Kavurmacı – Türkiye

Prof. Dr. Belkıs Özkara – Türkiye

Prof. Dr. Sevinj Seyidova – Azerbaijan

Prof. Dr. Al-Rashiff Hamjilani Mastul – Philipinnes

Prof. Dr. Alhisan U. Jemsy – Philippines

Prof. Dr. Eda Bozkurt – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Aysel Arslan - Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Sıddık Bakır – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Meryem Öztürk - Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Yeliz Çakır Sahilli - Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Berna Koçak - Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Dhesi Ari Astuti – Indonesia

Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Aydın - Türkiye

Assoc Prof. Dr. Feran Aşur – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Yasemin Taş – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Bülent Işık - Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Nurkan Yılmaz - Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Sevrə Fırınıoğulları - Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Abdulsemet Aydın – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Fırat Baran - Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Dilorom Hamroeva - Ozbekistan

Assoc. Prof. Dr. Abbas Ghaffari – Iran

Assoc. Prof. Ivaylo Staykov - Bulgaria

Assoc. Prof. Dr. Dini Yuniarti – Indonesia

Assoc. Prof. Dr. Ümit Ayata – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Həməzə Əliyev - Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Okan Sarıgöz – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Ahmet Topal – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Kırbaş – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Mesut Bulut – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Fahriye Emgili – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Sandeep Gupta – India

Assoc. Prof. Dr. Veysel Parlak – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Mahmut İslamoğlu – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. İrade Kerimova - Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Yeganə Qəhrəmanova – Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Ali Vandshoari – İran

Assoc. Prof. Dr. Dinara Fardeeva – Rusya

Assoc. Prof. Dr. Göksel Ulay – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Erkan Efilti – Kirgizistan

Assoc. Prof. Dr. Serdar Neslihanoglu - Türkiye

Assist. Prof. K. R. Padma – India

Assist. Prof. Dr. Omid Afghani - Afghanistan

Assist. Prof. Dr. Maha Hamdan Alanazi - Saudi Arabia

Assist. Prof. Dr. Dzhakipbek Altaevich Altayev - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Amina Salihi Bayero – Nigeria

Assist. Prof. Dr. Ahmad Sharif Fakheer - Jordania

Assist. Prof. Dr. Dody Hartanto - Indonesia

Assist. Prof. Dr. Ihwan Ghazali - Malaysia

Assist. Prof. Dr. Mehdi Meskini Heyladou – İran

Assist. Prof. Dr. Bazarhan İmangalieva - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Keles Nurmaşulı Jaylıbay - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Mamatkuli Juraev – Ozbekistan

Assist. Prof. Dr. Kalemkas Kalibaeva – Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Bouaraour Kamel – Algeria

Assist. Prof. Dr. Alia R. Masalimova - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Amanbay Moldibaev - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Ayslu B. Sarsekenova - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Bhumika Sharma - India

Assist. Prof. Dr. Gulşat Şugaeva – Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. K.A. Tleubergenova - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Cholpon Toktosunova – Kirgizia

Assist. Prof. Dr. Hoang Anh Tuan – Vietnam

Assist. Prof. Dr. Songül Atak - Türkiye

Assist. Prof. Dr. Botagul Turgunbaeva - Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Dinarakhan Tursunaliyeva - Kirgizia

Assist. Prof. Dr. Yang Zitong – China

Assist. Prof. Dr. Gulmira Abndirasulova – Kazakhstan

Assist. Prof. Dr. Imran Latif Saifi – South Africa

Assist. Prof. Dr. Murat Genç – Türkiye

Assist. Prof. Dr. Monisa Qadiri – India

Assist. Prof. Dr. Vaiva Balciuniene – Lithuania

Assist. Prof. Dr. Meltem Avan – Türkiye

Assist. Prof. Dr. Abışov Elşad Şərəfxan oğlu - Azerbaijan

Assist. Prof. Dr. Mahrukh Dovlatzade – Azerbaijan

Assist. Prof. Dr. Naci Büyükkaracığan – Türkiye

Assist. Prof. Dr. Raihan Yusoph – Philippines

Dr. Que-Nhu Duong - Vietnam

Dr. Mehmet Nuri Ödük – Türkiye

Dr. Ayşe Baran - Türkiye

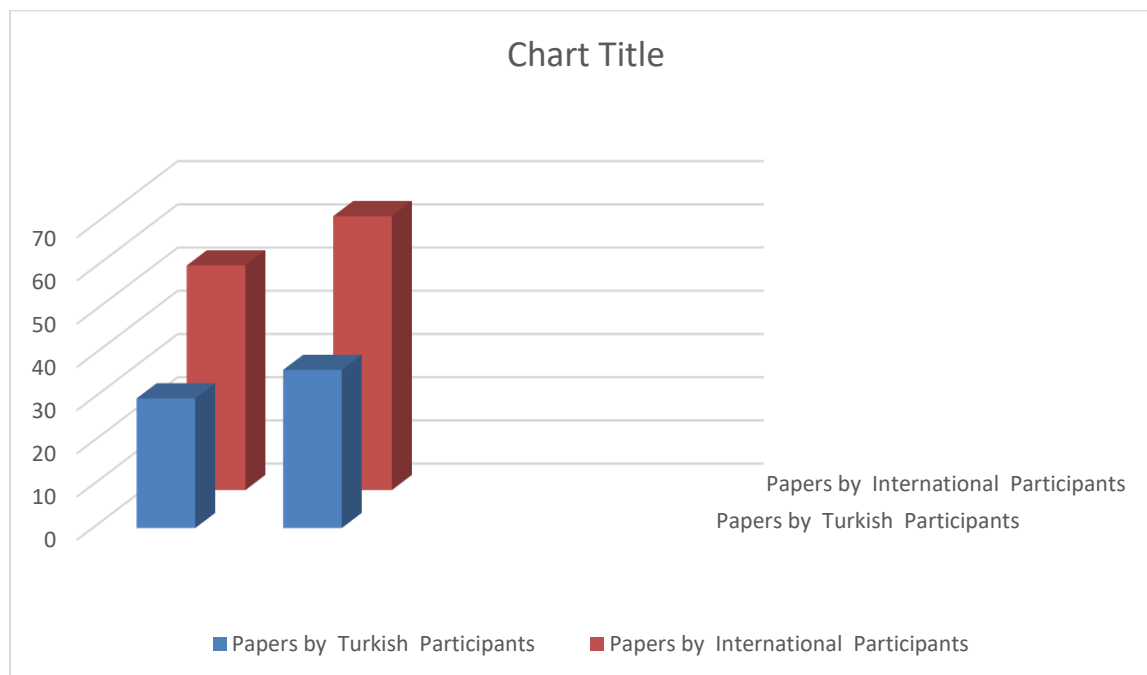
Dr. Dadash Mehravari – Iran

Dr. Aynurə Əliyeva - Azerbaijan

Dr. Sonali Malhotra – India

Dr. Amaneh Manafidizaji - Iran

	<i>Number of paper</i>	<i>%</i>
<i>Papers by Turkish Participants</i>	30	36,59
<i>Papers by International Participants (20 Countries)</i>	52	63,41





T.C.
GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Tıp Fakültesi



Sayı :E-98102723-903.07-475454

Konu :Görevlendirme Talebi

REKTÖRLÜK MAKAMINA

İlgi : 27.03.2024 tarihli ve E--903.07-474236 sayılı yazı

Fakültemiz Tıbbi Biyokimya Anabilim Dalı'nda görevli öğretim üyesi Prof. Dr. Hülya ÇİÇEK'in Yükseköğretim Genel Kurulunun 15.06.2023 tarihli, 10 sayılı oturumunda alınan 2023.10.183 sayılı kararı gereğince Doçentlik Başvuru Şartlarında bulunan ve doçent olacak adaylardan istenen "Diğer uluslararası/ ulusal bilimsel toplantının düzenleme komitesinde resmi olarak görevlendirilmiş üniversite akademisyen temsilcisi bulunması zorunludur." maddesi gereğince, Academy Global Conference & Journals tarafından yapılan kongrelerin düzenleme kurullarında yolluksuz ve yevmiyesiz olarak görevlendirilme talebi ile ilgili dilekçesi ekte gönderilmiştir

Adı geçen öğretim üyesinin Academy Global Conference & Journals tarafından yapılan kongrelerin düzenleme kurullarında yolluksuz, yevmiyesiz olarak görevlendirilmesinde Dekanlığımızca bir sakınca bulunmamaktadır.

Onaylarınıza arz ederim

Prof.Dr. Şevki Hakan EREN
Dekan

OLUR

Prof.Dr. Arif ÖZAYDIN
Rektör

Ek:İlgi Dilekçe (1 Adet)

Dağıtım:

Gereği:

Tıbbi Biyokimya Anabilim Dalı Başkanlığı

Bilgi:

Sayın Prof.Dr. Hülya ÇİÇEK

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Belge Doğrulama Kodu : *BSFN3RR3CF* Pin Kodu : 27962

Belge Takip Adresi : <https://turkiye.gov.tr/gaziantep-universitesi-ebys>

Adres : Gaziantep Üniversitesi Kampus Alanı, Tıp Fakültesi Dekanlığı, Şehitkamil - 27310 -

GAZİANTEP

Telefon : 0 (342) 360 60 60 Faks:0 (342) 360 16 17

e-Posta : tipfaksek@gmail.com Web : www.gantep.edu.tr/~tipdekanlik/bilgipaketi

Kep Adresi : gauntipdek@hs01.kep.tr

Bilgi için : Hüseyin Temel

Unvanı : Bilgisayar İşletmeni V.



ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND
SOCIAL SCIENCES
ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED
SCIENCES
ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL GROUP EXHIBITION
March 6 – 8, 2026
IZMIR

Kongre Bağlantı Linki :

Join Zoom Meeting

<https://us06web.zoom.us/j/88571518350?pwd=fOYazCWBmbAiWrHygjKSjkbbSvotfd.1>

Meeting ID: 885 7151 8350

Passcode: 202224



ÖNEMLİ AÇIKLAMA (Lütfen okuyunuz)

- ZOOM bağlantısı için yukarıda verilen bağlantıyı veya yine yukarıda verilen giriş bilgilerini kullanabilirsiniz.
- **Oturum içerisinde en KIDEMLİ olan moderatör olarak seçilir. Moderatörün oturum düzenini gözetmesi, akademisyen adaylarını yönlendirmesi beklenmektedir.**
- Oturuma bağlanmadan önce Salon numaranızı adınızın önüne aşağıdaki gibi ekleyiniz. Bu sayede kongre açılışında beklemeden oturumlarınıza gönderilebileceksiniz. Ör. 5 Ahmet Ahmetoglu
- **Sunum süresi 10 dakikadır. Bu sürenin aşılmasını moderatörler temin edecektir.**
- Sunum sonrası 5 dakikayı geçmeyen soru-cevap, tartışma süresi verilmektedir.
- **Sunumlar TÜRKÇE veya İNGİLİZCE yapılabilir.**
- Kameralar, oturum süresince toplam % 70 oranında açık olmak zorundadır.
- **Sunum yapan katılımcının kamerası açık olmak zorundadır.**
- Sunum yapmak zorunludur. **Herhangi bir nedenle sunum yapmamış olan katılımcıya sertifika verilmesi ve çalışmasının yayınlanması sözkonusu olamaz.**
- Katılımcı, kendi oturumda, oturum bitene kadar bulunmak zorundadır.
- Katılımcıların kendi oturumları dışındaki oturumlara katılma zorunluluğu yoktur.
- ZOOM platformunun kapasite sınırı nedeniyle, DİNLEYİCİ, sadece kapasite izin verdiği sürece kabul edilebilmektedir.
- **SADECE ÇALIŞMADA YAZAR OLARAK GEÇEN KİŞİLER SUNUM YAPABİLİR !**

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.
- Speakers must be connected to the session **10 minutes before** the presentation time.
- All congress participants can connect live and listen to all sessions.
- During the session, your camera should be turned on **at least %70** of session period
- Moderator is responsible for the presentation and scientific discussion (question-answer) section of the session.

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.
- Moderator is responsible for the presentation and scientific discussion (question-answer) section of the session.
- Before you login to Zoom please indicate your name surname and hall number,

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:00 – 13:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 1	Prof. Dr. Kelime ERDAL	1	THE FEMALE BODY AND THE MALE MORAL CONCEPTION IN VEDAT TURKALI'S NOVEL "WHAT IS FATMAGUL'S CRIME"	Doç. Dr. SEVRA FIRINCIOĞULLARI
		2	A STUDY ON THE LATEST GENERATION OF AMERICAN YOUTH: THE "T" GENERATION	Doç. Dr. SEVRA FIRINCIOĞULLARI
		3	ERZURUM'UN SOSYO-EKONOMİK DİNAMİĞİNDE BİR AHİ LİDERİ: AHİ TUMAN	Prof. Dr. Mehmet ÖZMENLİ Öğr. Gör. Gökhan HAMZAÇEBİ
		4	TÜRK KÜLTÜR COĞRAFYASI BAĞLAMINDA KARADENİZ MÜZİKLERİNDE KİMLİK	Öğr. Gör. Gökhan HAMZAÇEBİ Prof. Dr. Mehmet ÖZMENLİ
		5	A STUDY ON THE CULTURAL TRANSMISSION OF HOSPITALITY IN CHILDREN'S LITERATURE TEXTS	Prof. Dr. Kelime ERDAL
		6	THE VALUE OF FREEDOM IN CHILDREN'S LITERATURE: A READING THROUGH TEXTS	Prof. Dr. Kelime ERDAL
		7	XIX. YÜZYILIN BAŞINDA BATI ANADOLU'DA BİR İNGİLİZ SEYYAH: FRANCİS PETER WERRY'İN BATI ANADOLU SEYAHATI	Dr. Öğr. Üyesi, HÜSEYİN YILMAZ

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES				
March 6 – 8, 2026				
IZMIR				
Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224				
6 Mart / March 6, 2026 / 11:00 – 13:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 2	Doç. Dr. İBRAHİM BOZACI	1	NONLINEAR THRESHOLD TAYLOR RULE WITH BALANCE SHEET DYNAMICS: A REGIME-SWITCHING FRAMEWORK FOR HETERODOX POLICY ANALYSIS	Res. Assist. Dr., KAAN YİĞENOĞLU
		2	HETEROGENEOUS MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING FOR MACROECONOMIC STABILITY: A HETERODOX POLICY FRAMEWORK	Res. Assist. Dr., KAAN YİĞENOĞLU
		3	DİJİTAL EKOSİSTEMLERDE TÜKETİMİN YAPISAL DÖNÜŞÜMÜ: DİJİTAL DİDEROT ETKİSİ	Doç. Dr. Pınar ÖZKAN Prof. Dr. İpek DEVECİ KOCAKOÇ
		4	ULUSAL LİTERATÜRDE FEMVERTİSİNG VE KADIN TEMSİLİ: BİR META-SENTEZ DENEMESİ	Doç. Dr. Pınar ÖZKAN Prof. Dr. İpek DEVECİ KOCAKOÇ
		5	ALTERNATIVE MODELS AND POLICY OPTIONS IN HEALTH CARE FINANCING: AN EVALUATION OF MIXED SYSTEMS	Doç. Dr. Şahin KARABULUT Bilim Uzmanı, Ferda Büşra BÜYÜKKARAKURT
		6	A THEORETICAL EVALUATION OF UNETHICAL EMPLOYEE BEHAVIORS AND THEIR EFFECTS ON CONSUMERS	Doç. Dr. İBRAHİM BOZACI
		7	A THEORETICAL EVALUATION OF CONSUMER MASCULINITY	Doç. Dr. İBRAHİM BOZACI
		8	THE IMPACT OF COMPANY SIZE ON THE FULFILLMENT OF VOLUNTARY SOCIAL RESPONSIBILITIES TOWARDS EMPLOYEES	Öğr. Gör. Dr. YAHYA NAS
		9	THE USE OF REIKI IN DIABETES AND MENTAL HEALTH	Döne GÜNAY Sevda UZUN
			5	USE OF AROMATHERAPY in OLDER ADULTS AND MENTAL HEALTH

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:00 – 13:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 3	Dr. Öğr. Üye. Serhat KARAOĞLAN	1	ÇİN'İN SINCAN POLİTİKALARI BAĞLAMINDA DOĞU TÜRKİSTAN'DAKİ SİSTEMATİK HAK İHLALLERİ	Dr, Seda Gözde Tokatlı
		2	INTEGRATION OF LUCIS AND CA-MARKOV IN SUSTAINABLE SMART CITY PLANNING	Doç. Dr. Mehmet Fatih DÖKER Arş. Gör. Dr. Ahmet GÜL Dr. Öğr. Üyesi Selin Yıldız GÖRENTAŞ Doç. Dr. Cem KIRLANGIÇOĞLU
		3	IS SUSTAINABLE DEVELOPMENT POSSIBLE IN MANISA? SPATIAL INFERENCES BASED ON POTENTIAL AND PROPOSED SCENARIO ANALYSES	Dr. Öğr. Üyesi SELİN YILDIZ GÖRENTAŞ Doç. Dr. Mehmet Fatih DÖKER Arş. Gör. Dr. Ahmet GÜL Doç. Dr. Cem KIRLANGIÇOĞLU
		4	AİLE KONUTUNUN KORUNMASI	Av. Arb. MÜJGÂN ELİF KAPLAN
		5	TÜRK MEDENİ KANUNU'NDA BEKLEME SÜRESİ (İDDET MÜDDETİ): TEMEL HAKLAR IŞIĞINDA BİR DEĞERLENDİRME	Av. Arb. MÜJGÂN ELİF KAPLAN
		6	Can Disasters Be Marketed? Ethical Boundaries and Marketing Strategies of Disaster Tourism in the Context of Dark Tourism	Prof. Dr. Tülin DURUKAN Doç. Dr. Cihat KARTAL Dr. Öğr. Üye. Serhat KARAOĞLAN
		7	CAN ONE BAD APPLE SPOIL THE WHOLE BARREL? THE EFFECTS OF EMPLOYEES' OFF-THE-JOB BEHAVIORS ON BRAND REPUTATION: A REVIEW IN THE CONTEXT OF THE ROTTEN APPLE THEORY	Dr. Öğr. Üye. Serhat KARAOĞLAN Prof. Dr. Tülin DURUKAN Doç. Dr. Cihat KARTAL
		8	WHAT IS THEO-POLITICS?	Dr. Öğretim Üyesi ERSİN SAVAŞ

ISCS IZMİR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 İZMİR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:00 – 13:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 4	Dr. Öğr. Üyesi, Nursen GEYİK DEĞERLİ	1	SPATİAL ORGANİZATİON AND PERCEPTİON İN THE LİGHİT OF GESTALT THEORY	Öğr. Gör. Gültekin Erdal İdil Erdal
		2	MATERIAL AND DETAIL COMPATIBILITY PROBLEMS IN HISTORIC INTERIOR SPACES	İdil Erdal Öğr. Gör. Gültekin Erdal
		3	GÖRSEL KÜLTÜR AKTARIMINDA YAPAY ZEKANIN KULLANIMI	Dr. Öğr. Üyesi Hülya KAROĞLU Yunus Şafak KAHRAMAN
		4	PARAMETRİK MİMARİDEN İLHAM ALAN LAZER KESİM UYGULAMALARI: TEKSTİL YÜZEYİ VE AKSESUAR TASARIMI ÖRNEKLERİ	Yüksek Lisans Öğrencisi, Sevdanur ULUSOY Dr. Öğr. Üyesi, Nursen GEYİK DEĞERLİ
		5	SAĞLIK VE HASTALIK KAVRAMLARININ KAVRAMSAL ÇERÇEVDE KARŞILAŞTIRILMASI: BİYOPSİKOSOSYAL YAKLAŞIM PERSPEKTİFİ	Doç. Dr. Şahin KARABULUT Bilim Uzmanı, Mine KARANUH
		6	METHODS USED IN SPIRITUAL COUNSELING	Sümeyye AYATA Doç. Dr. Tolga SEKİ Prof. Dr. Bülent DİLMAÇ
		7	SPIRITUAL APPROACHES IN GROUP COUNSELING	Sümeyye AYATA Doç. Dr. Tolga SEKİ Prof. Dr. Bülent DİLMAÇ
		8	THE ETHICAL THOUGHT OF LORD HERBERT OF CHERBURY: THE PHILOSOPHICAL FOUNDATIONS AND IMPACTS OF THE NATURAL ETHICS THEORY	Ülkü Koçak
		9	NORMATİF YAŞAM DÖNGÜSÜNÜ KIRMAK: ÇOCUKSUZ YAŞLANMAK	Dr. Arş. Gör. Meryem Sarıköse

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:00 – 13:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 5	Dr. Ali UZUN	1	KIRSALDA MATEMATİK EĞİTİMİNDE KARŞILAŞILAN SORUNLARA İLİŞKİN BİLİMSEL ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ	Yüksek Lisans Öğrencisi, SEVGİ ÇOBAN Prof.Dr., KÜRŞAT YENİLMEZ
		2	KENT KIRSALINDA ÖĞRENİM GÖREN ORTAOKUL ÖĞRENCİLERİNİN MATEMATİK EĞİTİMİNDE TEKNOLOJİ KULLANIMLARINA İLİŞKİN TUTUMLARININ İNCELENMESİ	Yüksek Lisans Öğrencisi, HAYRUNİSA ZİNCİRYILDIZ Prof. Dr. KÜRŞAT YENİLMEZ
		3	TEXT TO IMAGE GENERATIVE AI FOR ENGLISH WRITING WITH MIDDLE SCHOOLERS	Miray İlgi AYAZ Doç. Dr. Zeynep YURTSEVEN AVCI
		4	THE IMPACT OF LANGUAGE AWARENESS ON THE CORRUPTION OF TURKISH IN THE CONTEXT OF EDUCATION AND CULTURAL IDENTITY FROM THE PERSPECTIVE OF THE AXIS	Dr. Öğr. Üyesi Hakan SARITİKEN Yüksek Lisans Öğrencisi Betül Sude BATMAN
		5	KİTAP OKUMA ALIŞKANLIĞININ KONUŞMA BECERİLERİ VE DERS ÇALIŞMA MOTİVASYONLARINA ETKİSİ İLE İLGİLİ ÖĞRENCİ GÖRÜŞLERİ	Prof. Dr. Oğuzhan SEVİM Dr. Ali UZUN
		6	THE TRANSFORMING STRUCTURE OF DIGITAL RECREATION: A REVIEW OF DIGITAL LEISURE TENDENCIES	İsmet SEVAL Dr. Okan SARI Doç. Dr. Şakir TÜFEKÇİ
		7	THE IMPACT OF SPORT-BASED SOCIAL RESPONSIBILITY PROJECTS ON PUBLIC PERCEPTION AND CORPORATE IMAGE	İsmet SEVAL Dr. Okan SARI Doç. Dr. Şakir TÜFEKÇİ

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:30 – 13:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 6	Dr. David Ochieng	1	SERVICE QUALITY AND CUSTOMER SATISFACTION IN DIGITAL BANKING PLATFORMS: EVIDENCE FROM KENYAN UNIVERSITIES	Dr. Peter Mwangi Dr. Grace Akinyi
		2	INTERNAL SERVICE QUALITY AND EMPLOYEE ENGAGEMENT IN KENYAN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS	Prof. Dr. Jane Wanjiru Dr. David Ochieng
		3	CUSTOMER EXPERIENCE MANAGEMENT IN KOREAN ONLINE FOOD DELIVERY SERVICES: A SERVICE-DOMINANT LOGIC PERSPECTIVE	Prof. Dr. Min-Jae Kim Dr. Hana Park
		4	SERVICE INNOVATION AND OMNICHANNEL STRATEGIES IN KOREAN RETAIL BANKING	Assoc. Prof. Dr. Soo-Yeon Lee Jin-Woo Choi
		5	PERCEIVED SERVICE QUALITY AND LOYALTY IN PRIVATE HOSPITALS: EVIDENCE FROM BANGLADESHI PATIENTS	Prof. Dr. Rahman Hossain Dr. Sumaiya Akter Md. Faridul Islam
		6	SERVICE RECOVERY STRATEGIES IN BANGLADESHI TELECOMMUNICATIONS: IMPACT ON CUSTOMER TRUST	Dr. Nazmul Arefin Assoc. Prof. Dr. Parvin Sultana
		7	SERVICE EXPERIENCE AND VALUE CO-CREATION IN THAI BOUTIQUE HOTELS	Assoc. Prof. Dr. Nattapong Chaiyasit Dr. Siriporn Kittipong Pimnipa Thongchai
		8	E-SERVICE QUALITY AND ONLINE PURCHASE INTENTION IN THAI E-COMMERCE PLATFORMS	Dr. Chatchai Phanich Prof. Dr. Ratchanee Srisuk Assis. Prof. Dr. Waraporn Limsiri

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:30 – 13:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 7	Assoc. Prof. Dr. Leila Cherif Dr. Mourad Hamadi	1	JUDICIAL REVIEW AND THE PROTECTION OF FUNDAMENTAL RIGHTS IN THE ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN	Prof. Dr. Reza Mohammadi Dr. Laleh Karami
		2	LEGAL FRAMEWORKS FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION IN IRAN: CHALLENGES OF IMPLEMENTATION AND ENFORCEMENT	Assoc. Prof. Dr. Zahra Hosseini Dr. Amir Farshad
		3	ADMINISTRATIVE JUSTICE AND CITIZENS' RIGHT TO GOOD ADMINISTRATION IN ALGERIA	Samir Benkhelifa Dr. Nadia Bensalem Rachid Amrani
		4	CRIMINAL POLICY AND THE FIGHT AGAINST CORRUPTION IN THE ALGERIAN PUBLIC SECTOR	Assoc. Prof. Dr. Leila Cherif Dr. Mourad Hamadi
		5	JUDICIAL INDEPENDENCE AND COURT REFORM IN GEORGIA: PROGRESS AND PERSISTENT CHALLENGES	Prof. Dr. Giorgi Amiranashvili Dr. Nino Mikeladze Assis. Prof. Dr. Levan Beridze
		6	HUMAN RIGHTS EDUCATION AND THE TRANSFORMATION OF LEGAL CURRICULA IN GEORGIAN LAW SCHOOLS	Assoc. Prof. Dr. Tamar Kapanadze Dr. Irakli Giorgadze
		7	CONSTITUTIONAL REVIEW, SEPARATION OF POWERS, AND JUDICIAL INDEPENDENCE IN THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN	Prof. Dr. Elvin Mammadov Dr. Aysel Aliyeva
		8		

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:30 – 13:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 8	Prof. Dr. Giorgi Amiranashvili	1	RELIGIOUS PLURALISM AND NATIONAL IDENTITY IN CONTEMPORARY AZERBAIJAN	Prof. Dr. Elchin Mammadov Aysel Huseynova
		2	SECULARISM, ISLAM, AND YOUTH VALUES IN POST-SOVIET AZERBAIJAN	Assoc. Prof. Dr. Nigar Aliyeva Ramil Safarov
		3	REASON, REVELATION, AND ETHICAL UNIVERSALISM IN CONTEMPORARY IRANIAN PHILOSOPHY OF RELIGION	Prof. Dr. Farhad Rahimi Dr. Maryam Sadat Hosseini
		4	SUFISM, POLITICAL AUTHORITY, AND SOCIAL CRITIQUE IN MODERN IRANIAN THOUGHT	Dr. Hossein Karimi
		5	ISLAMIC PHILOSOPHY, MODERNITY, AND RELIGIOUS REFORM DISCOURSES IN ALGERIA	Prof. Dr. Samir Benkhelfallah Dr. Nadia Kerras
		6	RELIGION, MEMORY, AND POSTCOLONIAL IDENTITY IN ALGERIAN PHILOSOPHICAL DEBATES	Dr. Amel Bouzid Assis. Prof. Dr. Rachid Lounis
		7	ORTHOOX THEOLOGY, PHILOSOPHY, AND CIVIC ETHICS IN CONTEMPORARY GEORGIA	Prof. Dr. Giorgi Amiranashvili Dr. Tamar Kapanadze

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:30 – 13:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 9	Dr. Rajiv Desai	1	EQUITY IN EDUCATION POLICY IMPLEMENTATION ACROSS URBAN AND RURAL SCHOOLS IN IRAN	Prof. Dr. Reza Azizi Fatemeh Ghadiri
		2	DIGITAL TECHNOLOGY INTEGRATION AND TEACHER PROFESSIONAL DEVELOPMENT IN IRANIAN HIGHER EDUCATION	Dr. Laleh Etemad Assoc. Prof. Dr. Mahmoud Daryaei Samira Parsa Ali Soufi
		3	MULTILINGUAL EDUCATION AND INTERCULTURAL COMPETENCE DEVELOPMENT IN INDIAN URBAN SCHOOLS	Prof. Dr. Suresh Mehra Dr. Priya Banerjee
		4	PROJECT-BASED LEARNING INITIATIVES AND STEM MOTIVATION IN INDIAN SECONDARY EDUCATION	Dr. Anand Bhatia Anisha Singh Prof. Dr. Kavita Subramanian Assoc. Prof. Dr. Deepak Nair
		5	UNIVERSITY-GOVERNMENT PARTNERSHIPS FOR EDUCATIONAL REFORM IN RURAL INDIA	Dr. Rajiv Desai
		6	THE IMPACT OF BILINGUAL EDUCATION PROGRAMS ON STUDENT LITERACY IN ALGERIAN PRIMARY SCHOOLS	Dr. Yasmine Benali Prof. Dr. Houcine Amrani Assis. Prof. Dr. Layla Cherif
		7	EVALUATING THE USE OF EDUCATIONAL TECHNOLOGIES IN ALGERIAN HIGHER EDUCATION	Prof. Dr. Amine Boukhalfa Dr. Nadia Zerguini
		8	INCLUSIVE PEDAGOGY STRATEGIES FOR DIVERSE CLASSROOMS IN ITALIAN ELEMENTARY SCHOOLS	Assis. Prof. Dr. Lucia Romano Prof. Dr. Giovanni Ferri
		9	RETHINKING HIGHER EDUCATION ADMISSIONS: HOLISTIC STRATEGIES IN ITALIAN UNIVERSITIES	Prof. Dr. Stefano Mancini Elena Vitale Assoc. Prof. Dr. Marco Santoro Dr. Silvia Esposito Assis. Prof. Dr. Paolo Bellini

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:30 – 13:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 10	Assoc. Prof. Dr. Fatima Zohra Belkacem	1	EXPLORING THE SOCIO-ECONOMIC IMPACTS OF INTERNAL MIGRATION IN IRAN: CHALLENGES AND POLICY RESPONSES	Prof. Dr. Shirin Etemadi Dr. Hossein Mohammadi Assis. Prof. Dr. Parisa Rashidi
		2	THE ROLE OF TRANSNATIONAL NETWORKS IN SHAPING MIGRATION EXPERIENCES AMONG IRANIAN DIASPORA	Dr. Farzaneh Parsa Assoc. Prof. Dr. Siamak Jahanbakhsh
		3	MIGRATION AND SECURITY: UNDERSTANDING BORDER DYNAMICS IN PAKISTAN'S PERIPHERAL REGIONS	Prof. Dr. Habib Ullah Khan Dr. Sana Javed Muhammad Adeel
		4	GENDER AND MIGRATION: NAVIGATING OPPORTUNITIES AND VULNERABILITIES FOR PAKISTANI WOMEN	Assis. Prof. Dr. Saleema Khatoon Dr. Maria Qureshi Hina Nazir
		5	YOUTH MIGRATION AND EDUCATION ASPIRATIONS AMONG ALGERIAN RURAL COMMUNITIES	Prof. Dr. Mourad Bouzid Nassim Daoud
		6	SOCIAL INTEGRATION OF SUB-SAHARAN MIGRANTS IN ALGERIAN URBAN CENTERS	Assoc. Prof. Dr. Fatima Zohra Belkacem Dr. Ahmed Meftah Nadia Benhamou
		7	CIRCULAR MIGRATION AND RETURN DYNAMICS: THE CASE OF AZERBAIJANI LABOR MIGRANTS	Prof. Dr. Kamran Huseynov Vusal Aliyev Vafa Guliyeva Leyla Babayeva

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:30 – 13:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 11	Assis. Prof. Dr. Saule Sagintayeva	1	WOMEN'S ECONOMIC EMPOWERMENT THROUGH ENTREPRENEURSHIP IN URBAN KAZAKHSTAN	Prof. Dr. Aigerim Nurtayeva Zhanar Askarova
		2	HEALTHCARE ACCESS FOR WOMEN IN RURAL AREAS OF KAZAKHSTAN: CHALLENGES AND STRATEGIES	Assis. Prof. Dr. Saule Sagintayeva
		3	GENDER NORMS AND WOMEN'S EDUCATIONAL ATTAINMENT IN CONTEMPORARY IRAQ	Prof. Dr. Farah Abbas Dr. Mahmoud Fadhil Sara Al Zubaidi
		4	IMPACT OF CONFLICT ON THE HEALTH AND WELLBEING OF WOMEN IN IRAQ	Dr. Rasha Yassin Assis. Prof. Dr. Omar Al-Khafaji
		5	BARRIERS TO WOMEN'S POLITICAL PARTICIPATION IN LAOS: SOCIAL, ECONOMIC, AND CULTURAL FACTORS	Assoc. Prof. Dr. Soudaly Nanthavong
		6	WOMEN'S ACCESS TO HIGHER EDUCATION AND STEM FIELDS IN LAOS	Prof. Dr. Bouavone Xayavong Dr. Sivilay Phommasane Keomany Souvannavong Assis. Prof. Dr. Anousone Chanthavong
		7	SOCIOECONOMIC IMPACT OF MICROFINANCE INITIATIVES FOR WOMEN ENTREPRENEURS IN BANGLADESH	Dr. Masuda Akhter Prof. Dr. Sultana Begum Ayesha Rahman
		8	WOMEN'S HEALTH AND REPRODUCTIVE RIGHTS IN BANGLADESHI SLUMS: CHALLENGES AND INTERVENTIONS	Assis. Prof. Dr. Shanta Parvin

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY AND SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 11:30 – 13:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 12	Prof. Dr. Ahmed Al-Hashmi	1	EXPLORING THE NARRATIVE TRADITION IN MODERN KYRGYZ THEATRE	Assis. Prof. Dr. Ruslan Nogoibekov Ainura Abdrakhmanova
		2	THE REVIVAL OF NOMADIC MOTIFS IN CONTEMPORARY KYRGYZ VISUAL ART	Prof. Dr. Aizada Sadykova Dr. Aidar Sulaimanov
		3	ARTISTIC RESISTANCE AND THE VISUAL REPRESENTATION OF IDENTITY IN CONTEMPORARY PALESTINIAN ART	Prof. Dr. Samira Al-Masri Dr. Fadi Taleb Nour Said
		4	THE REVITALIZATION OF TRADITIONAL CERAMICS AND TILE ART IN PALESTINIAN DESIGN EDUCATION	Assis. Prof. Dr. Yasmine Khalil Dr. Ibrahim Amro
		5	EXPERIMENTAL MEDIA INSTALLATIONS AND THE EVOLUTION OF ARTISTIC PRACTICE IN SINGAPORE	Prof. Dr. Kenneth Lim Jolene Tan Wei Liang Chong
		6	THE ROLE OF PUBLIC ART IN SINGAPORE'S CITYSCAPE: CULTURAL POLICY, PLACE-MAKING, AND COMMUNITY ENGAGEMENT	Dr. Mei Wong
		7	REINTERPRETATION OF ARABESQUE GEOMETRY IN CONTEMPORARY OMANI ISLAMIC ART	Assoc. Prof. Dr. Maha Al-Lamki Fatma Rashid Al-Saadi
		8	ART EDUCATION IN OMAN: CHALLENGES AND INNOVATIONS IN VISUAL CURRICULUM DESIGN	Prof. Dr. Ahmed Al-Hashmi
		9	THE EVOLUTION OF IMPRESSIONISM IN FRENCH PAINTING AND ITS GLOBAL LEGACY	Prof. Dr. Bernard Dupont Marie-Claire Rivière Julien Leroy

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:00 – 17:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 1	Assoc. Prof. Dr., ESMA YIGIDER	1	Adaptation of the Agri-Food Industry to Climate Change: Towards Sustainable Water Management	Ali Khalfa Azzeddine Senouci Mounir Chihab Bouazza Sofiane
		2	Functional Foods and Probiotic Applications in Human Health	Ali Khalfa Azzeddine Senouci Mounir Chihab Bouazza Sofiane
		3	IRON BIOFORTIFICATION IN CEREALS: FROM PLANT GENETICS TO PRECISION BREEDING STRATEGIES	Assoc. Prof. Dr., ESMA YIGIDER Prof. Dr., MELEK EKINCI Prof. Dr., MURAT AYDIN Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM
		4	ABIOTIC STRESSES IN PLANTS AND ASTAXANTHIN	Prof. Dr., MELEK EKINCI Assoc. Prof. Dr., ESMA YIGIDER Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM Prof. Dr., MURAT AYDIN
		5	BAZI ÇİLEK ÇEŞİTLERİNİN KALİTE ÖZELLİKLERİ VE FARKLI KURUTMA YÖNTEMLERİNİN KURU MADDE İÇERİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ	Arş. Gör. Merve KARAKOYUN MUTLUAY Lis. Öğr. Enes Can AYDIN Doç. Dr. Sinem ÖZTÜRK ERDEM
		6	PEYNİR ÜRETEEN İŞLETMELERDE PEYNİR ALTI SUYUNUN DEĞERLENDİRİLMESİNE İLİŞKİN YAKLAŞIMLARIN EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ: BİR LİTERATÜR İNCELEMESİ	Ziraat Mühendisi , NADİRE BUCAK Prof.Dr , NEVİN DEMİRBAŞ Dr.Öğr.Üyesi , YARKIN AKYÜZ

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:00 – 17:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 2	Assoc. Prof. Dr., Aydanur AYDIN	1	The Role of Nutrition in Optimizing Basketball Athlete Performance	Dott. Dorian META PhDc Assoc. Prof. Dr. Oltiana PETRI MD
		2	DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN NURSING CARE: PREVENTING CARE ERRORS AND FUTURE PROJECTIONS	Assoc. Prof. Dr., Aydanur AYDIN
		3	ALGORITHMIC BIAS AND ETHICS: THE HIDDEN RISKS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NURSING AND PATIENT SAFETY	Assoc. Prof. Dr., Aydanur AYDIN

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:00 – 17:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 3	Prof.Dr. Ali Can YILMAZ	1	TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE ISI POMPASI KULLANIMI	Prof.Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM Dr. Ümran ATAY
		2	TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MATERYAL (PCM) KULLANIMI	Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM Dr. Ümran ATAY Prof.Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK
		3	SMART INJECTION MOLDING SYSTEM DEVELOPMENT: MOBILE-INTEGRATED HMI AND PRECISE BARREL TEMPERATURE CONTROL	MUHAMMED TALHA ALTUN Doç. Dr. BÜLENT KAYA
		4	EVOLUTION FROM ACTIVE SAFETY SYSTEMS TO ADAS: A VEHICLE DYNAMICS AND SENSOR FUSION-BASED SYSTEM-LEVEL REVIEW	Öğr. Gör. METİN KAYNAKLI Dr. Öğr. Üy., AHMET ALBAYRAK
		5	A VEHICLE DYNAMICS-BASED CONCEPTUALIZATION OF ACTIVE SAFETY SYSTEMS AS REAL-TIME BOUNDARY MANAGEMENT MECHANISMS	Öğr. Gör. METİN KAYNAKLI Dr. Öğr. Üy., AHMET ALBAYRAK
		6	FREN BALATALARINDA ARAMİD ve CAM ELYAFLI TEKSTİL KATMANLARININ SÜRTÜNME STABİLİTESİ ve AŞINMA PERFORMANSINA ETKİSİ	Prof.Dr. Ali Can YILMAZ Doç.Dr. Özlem ERDEM YILMAZ
		7	PET BAZLI OTOMOTİV KOLTUK KUMAŞINDA UYGULANAN HALOJENLİ ve HALOJENSİZ ALEV GECİKTİRİCİ BİTİM İŞLEMLERİNİN YANICILIK ve DUMAN PERFORMANSINA ETKİLERİ	Doç.Dr. Özlem ERDEM YILMAZ Prof.Dr. Ali Can YILMAZ
		8	MODIFIED-ATMOSPHERE (NITROGEN-FLUSHED) PACKAGING AND QUALITY EVOLUTION OF EXTRUDED SNACKS DURING STORAGE	Selin ÖZTÜRK Prof. Dr. FATMA YURT
		9	JELKOT KAPLI CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİT MALZEMENİN YÜZEY DAYANIMLARININ İNCELENMESİ	Yüksek Lisans Öğrencisi, SUDE MERAL Prof. Dr., EROL FEYZULLAHOĞLU

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:00 – 17:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 4	Dr., Gizem Saygı	1	A COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTITATIVE VARIABLES IN THE PEARSON, SPEARMAN RANK AND KENDALL TAU CORRELATION COEFFICIENT	Jibrin S. Yasin A. Nuhu Jamilu Adamu Ahmad S. Sa'id Abubakar A. Shuaibu
		2	USING A SPEARMAN'S RANK CORRELATION COEFFICIENT IN EVAPORATION AND HUMIDITY	Jibrin S. Yasin A. Nuhu Jamilu Adamu Sulaiman B. Abubakar
		3	CAPACITY PLANNING AND DIGITAL TRANSFORMATION ANALYSIS IN THE FURNITURE INDUSTRY: THE ANKARA EXAMPLE	Dr. Ramazan BÜLBÜL Mustafa ALBAYRAK
		4	DEVELOPMENT OF ADHESIVE-FREE COMPOSITE PANELS THROUGH THE COMBINATION OF WASTE TETRAPAK PACKAGING AND NATURAL WOOD VENEERS	Dr. Ramazan BÜLBÜL Musa Bedirhan SÜRÜCÜ Murat CAN
		5	GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE GERÇEK VE SİMÜLASYON TABANLI TESİSLERDE PERFORMANS ANALİZİ	Şeyma BİLGİN Dr. Öğr. Üyesi Yahya DANAYİYEN
		6	SYNTHESIS OF MOFS@COTTON MATERIALS AS PHOTOCATALYST	Dr., Gizem Saygı Prof. Dr., Fehime Çakıcıoğlu Özkan
		7	NANO PEKTİNİN YAPISAL, KOLLOİDAL VE FOTO-DUYARLI MIS ARAYÜZEY DAVRANIŞININ ÇOK YÖNLÜ KARAKTERİZASYONU	YASEMİN ERHAN Prof. Dr. OSMAN PAKMA Prof. Dr. İ. AFŞİN KARİPER

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:00 – 17:00 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 5	Doç. Dr. Ümit AYATA	1	BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM VE SATHİ KAPLAMANIN FAYDA-MALİYET ANALİZLERİYLE ÖRNEK BİR YOL KESİMİ ÜZERİNDEN KARŞILAŞTIRILMASI	SUDE ÖZALTIN Dr. Öğr. Üyesi GÖZDE SEZGİN TUNÇAY
		2	1975 ÖNCESİ İNŞA EDİLEN BETONARME BİR YAPININ FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ	Prof. Dr. Ercan IŞIK Doç. Dr. Fatih AVCİL Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ
		3	06 ŞUBAT 2023 DEPREMLERİNİN ARDINDAN MALATYA'DAKİ BETONARME YAPILARIN YAPISAL DÜZENSİZLİKLER AÇISINDAN İNCELENMESİ	Doç. Dr. Fatih AVCİL Prof. Dr. Ercan IŞIK Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ
		4	A STUDY ON DYEING COTTON FABRICS WITH TURMERIC POWDER AND ALUM	Arş. Gör. Dr. Keziban SELÇUK Doç. Dr. Ümit AYATA
		5	EFFECTS OF EXPOSURE TO HOUSEHOLD CHEMICALS ON COLOR PARAMETERS OF COMMON ASH WOOD AFTER DIFFERENT TREATMENTS AND APPLICATION OF SINGLE AND TWO-COMPONENT PARQUET VARNISHES	Mete AKTER Doç. Dr. Ümit AYATA

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANITY and SOCIAL SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:30 – 17:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 6	Prof. Dr. Mohammadreza Shafiei	1	EDUCATIONAL OUTCOMES OF MULTILINGUAL POLICY IN TAJIK SECONDARY EDUCATION	Assoc. Prof. Dr. Rustam Juraev Dr. Barno Kuvatova Shodmonbek Nazarov
		2	INTEGRATING TRADITIONAL PEDAGOGY WITH DIGITAL INNOVATION IN TAJIK PRIMARY SCHOOLS	Prof. Dr. Gulnora Sharipova Dr. Nargis Iskandarova
		3	THE IMPACT OF VALUE-BASED EDUCATION PROGRAMS ON MORAL DEVELOPMENT IN EGYPTIAN STUDENTS	Prof. Dr. Ahmed Mahmoud Dr. Sara El-Tantawy Assis. Prof. Dr. Hossam Saad
		4	CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN INCLUSIVE EDUCATION IN RURAL EGYPT	Assoc. Prof. Dr. Mona Zaki Marwan Youssef
		5	INNOVATIVE PRACTICES IN STEM TEACHER TRAINING: A CASE STUDY FROM IRAN	Dr. Parisa Sadeghi
		6	IMPACT OF PRIVATE SCHOOL GROWTH ON EDUCATIONAL INEQUALITY IN URBAN IRAN	Prof. Dr. Mohammadreza Shafiei Dr. Leyla Karimi
		7	PROJECT-BASED LEARNING AS A DRIVER OF STUDENT MOTIVATION IN INDIAN MIDDLE SCHOOLS	Assoc. Prof. Dr. Ananya Rao Ankit Mehra Dr. Rakesh Khanna
		8	ENHANCING ENGLISH LANGUAGE COMPETENCIES IN INDIAN ENGINEERING UNDERGRADUATES THROUGH ESP PROGRAMS	Prof. Dr. Kavita Singh Meera Raghavan

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:30 – 17:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 7	Assoc. Prof. Dr. Zainab Johari	1	ADAPTIVE REUSE OF HISTORICAL BUILDINGS IN BAKU: CONTEMPORARY CHALLENGES AND INNOVATIVE SOLUTIONS	Prof. Dr. Kamran Guliyev Leyla Mammadova
		2	INTEGRATING TRADITIONAL AZERBAIJANI DESIGN PRINCIPLES INTO CONTEMPORARY URBAN HOUSING	Assoc. Prof. Dr. Elvin Hasanov Nigar Suleymanli Farid Gasimov
		3	SUSTAINABLE FLOOD-RESISTANT ARCHITECTURE FOR BANGLADESH'S GROWING DELTA REGIONS	Dr. Mustafa Rahman Assis. Prof. Dr. Nabila Hasan Tariq Chowdhury Samia Akhtar
		4	URBAN DENSIFICATION AND GREEN SPACE PRESERVATION IN DHAKA: DESIGN STRATEGIES AND POLICY APPROACHES	Prof. Dr. Sharmin Akter Dr. Nusrat Jahan
		5	INTEGRATING MODULAR CONSTRUCTION WITH MALAYSIAN VERNACULAR ARCHITECTURE: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES	Prof. Dr. Ahmad Rashid Farah Nazirah Ramli Assis. Prof. Dr. Lim Sze Wee
		6	TROPICAL ENVIRONMENTAL RESPONSIVENESS IN MALAYSIAN UNIVERSITY CAMPUS DESIGN	Assoc. Prof. Dr. Zainab Johari Harris bin Abdullah Dr. Amelia Lee
		7	REHABILITATION OF OTTOMAN-ERA BUILDINGS IN SKOPJE: HISTORICAL ANALYSIS AND CONTEMPORARY CONSERVATION	Dr. Elena Dimitrova Prof. Dr. Nikola Jovanovic Selma Ismaili Bojan Petrovski Liridona Selmani
		8	URBAN TRANSFORMATION AND SOCIAL INCLUSION IN POST-SOCIALIST SKOPJE: PUBLIC SPACE REDESIGN	Assoc. Prof. Dr. Danilo Milanovic Assis. Prof. Dr. Marija Pavlovska Ana Petreski

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:30 – 17:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 8	Dr. Fatema Habibi	1	RENEWABLE ENERGY INTEGRATION IN SMART GRIDS: CHALLENGES AND SOLUTIONS IN PAKISTAN	Prof. Dr. Imran Malik Dr. Tayyaba Zahid Dr. Bilal Hussain
		2	DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR FAULT DETECTION IN HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION LINES	Dr. Maryam Qureshi Assis. Prof. Dr. Sheraz Ahmed
		3	PHOTOVOLTAIC SYSTEM PERFORMANCE OPTIMIZATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN EGYPTIAN DESERTS	Prof. Dr. Ahlam Abdelrahman Dr. Mostafa Khalil Assis. Prof. Dr. Mariam Fouad Nada El-Din
		4	DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SMART ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE IN CAIRO	Assis. Prof. Dr. Youssef Amin Dr. Hoda Samir
		5	ANALYSIS OF MICROGRID STABILITY UNDER VARIABLE LOAD AND GENERATION CONDITIONS IN KABUL	Dr. Parwiz Hashimi
		6	EFFICIENT POWER CONVERTER DESIGN FOR RURAL ELECTRIFICATION IN AFGHANISTAN	Prof. Dr. Laila Saidi Assis. Prof. Dr. Mohammad Rahmani Dr. Zainab Nazari Ali Asadi
		7	WIRELESS COMMUNICATION FRAMEWORKS FOR REMOTE HEALTH MONITORING IN RURAL AFGHANISTAN	Dr. Ahmad Fahim Niloofar Qaderi
		8	DESIGN AND TESTING OF FAULT-TOLERANT MOTOR DRIVES FOR INDUSTRIAL AUTOMATION	Dr. Fatema Habibi
		9	AI-POWERED IMAGE RECOGNITION TECHNOLOGIES FOR CIVIL INFRASTRUCTURE MONITORING IN KABUL	Assis. Prof. Dr. Amir Rezai Dr. Haroon Hussaini Maryam Ali Omid Najafi

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:30 – 17:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 9	Assis. Prof. Dr. Jona Dervishi Dr. Renis Tashi	1	EVALUATING THE IMPACT OF HEALTH EDUCATION PROGRAMS ON DIABETES PREVENTION IN IRANIAN COMMUNITIES	Prof. Dr. Shirin Jafari Dr. Nima Ebrahimi Assis. Prof. Dr. Laleh Moradi
		2	GENETIC SCREENING AND COUNSELING FOR HEREDITARY CANCERS: PRACTICES AND CHALLENGES IN IRAN	Assis. Prof. Dr. Roya Behzad Dr. Navid Parsa
		3	STRENGTHENING MATERNAL HEALTHCARE ACCESS IN LOW-RESOURCE NIGERIAN SETTINGS	Prof. Dr. Olufunmilayo Adeyemi Dr. Jamila Musa Assis. Prof. Dr. Chinedu Okeke Ngozi Chukwu
		4	BURDEN OF MALARIA AND COMMUNITY RESPONSES TO VECTOR CONTROL IN RURAL NIGERIA	Dr. Adedayo Ogunleye Assis. Prof. Dr. Funke Adebayo
		5	REFORMING MEDICAL EDUCATION IN ALBANIA: COMPETENCY-BASED CURRICULA AND TEACHING STRATEGIES	Prof. Dr. Arben Leka Dr. Elda Nuri Blendi Sorra Assis. Prof. Dr. Lira Hysa
		6	CHALLENGES IN IMPLEMENTING ELECTRONIC HEALTH RECORDS (EHR) SYSTEMS IN ALBANIAN HOSPITALS	Assis. Prof. Dr. Jona Dervishi Dr. Renis Tashi
		7	PREVALENCE OF CARDIOVASCULAR RISK FACTORS AMONG UNIVERSITIES' STUDENTS IN MONGOLIA	Prof. Dr. Bat-Erdene Batbayar Dr. Oyun-Erdene Tungalag Erdenebat Naranbaatar
		8		

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:30 – 17:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 10	Dr. Yasmine Belkadhi	1	SUSTAINABLE OLIVE CULTIVATION PRACTICES AND THEIR IMPACT ON SOIL HEALTH IN TUNISIA	Prof. Dr. Nabil Ben Youssef Dr. Hela Amari
		2	WATER MANAGEMENT STRATEGIES FOR IRRIGATED AGRICULTURE IN SEMI-ARID TUNISIAN REGIONS	Dr. Yasmine Belkadhi
		3	IMPROVING SORGHUM YIELD THROUGH GENETIC DIVERSITY AND AGROECOLOGICAL PRACTICES IN ETHIOPIA	Prof. Dr. Amare Getahun Dr. Hana Tsegaye Assis. Prof. Dr. Bekele Alemu
		4	INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND BIOPESTICIDES IN ETHIOPIAN HORTICULTURE	Dr. Sosina Abebe Mulu Worku
		5	PRECISION AGRICULTURE APPLICATIONS IN WINTER WHEAT PRODUCTION IN RUSSIA	Dr. Nikolai Petrov Assoc. Prof. Dr. Svetlana Ivanova
		6	RUSSIAN GRASSLAND MANAGEMENT: CONSERVATION, CARBON SEQUESTRATION, AND LIVESTOCK PRODUCTIVITY	Prof. Dr. Olga Smimova Dr. Aleksandr Vasiliev Ivan Kovalev
		7	MODERN DESERT FARMING TECHNIQUES IN THE ARABIAN PENINSULA: CHALLENGES AND PROSPECTS	Prof. Dr. Maha Al-Zahrani Dr. Omar Al-Barakati Assis. Prof. Dr. Waleed Al-Yousef Nasser Al-Farsi
		8	RECLAIMING MARGINAL LANDS FOR AGRICULTURE IN ARID REGIONS OF THE ARAB WORLD	Dr. Hanan Al-Salem Prof. Dr. Saeed Al-Harbi

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:30 – 17:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 11	Assis. Prof. Dr. Hani Nasr	1	DEVELOPMENT AND PHARMACOKINETIC EVALUATION OF HERBAL ANTIOXIDANT FORMULATIONS FOR CHRONIC DISEASE MANAGEMENT	Prof. Dr. Lamia Bensalem Dr. Karim Djeghlal
		2	CURRENT CHALLENGES IN ANTIMICROBIAL STEWARDSHIP PROGRAMS IN ALGERIAN HOSPITAL PHARMACY PRACTICE	Assis. Prof. Dr. Nesrine Toumi Dr. Ilyes Bendaoud
		3	NICOTINE ADDICTION AND PHARMACOLOGICAL INTERVENTIONS AMONG SYRIAN YOUTH: A CROSS-SECTIONAL STUDY	Prof. Dr. Nour Al-Shami Dr. Bassel Haddad Dr. Lina Mansour
		4	EVALUATION OF TRADITIONAL HERBAL DRUG USE IN PHARMACEUTICAL PRACTICE IN SYRIA	Assis. Prof. Dr. Hani Nasr Amina Qabbani
		5	CLINICAL OUTCOMES OF MULTI-DRUG THERAPY FOR TUBERCULOSIS PATIENTS IN SENEGAL: A PHARMACY-BASED COHORT STUDY	Dr. Aissatou Faye Moussa Ndiaye Prof. Dr. Alioune Diop
		6	PHARMACOVIGILANCE AND ADVERSE DRUG REACTION REPORTING SYSTEMS IN SENEGALESE HOSPITALS	Prof. Dr. Marième Diouf Assis. Prof. Dr. Serigne Gueye Fatoumata Sarr Dr. Abdoulaye Diallo
		7	EVALUATION OF PHARMACOGENOMIC TESTING PRACTICES IN AZERBAIJANI COMMUNITY PHARMACIES	Prof. Dr. Leyla Abbasova Dr. Kamran Akhundov Dr. Arzu Guliyeva
		8		

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:30 – 17:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 12	Assis. Prof. Dr. Pablo Alonso	1	PARASITIC INFESTATIONS IN SMALL RUMINANTS: CHALLENGES FOR RURAL LIVESTOCK FARMERS IN TAJIKISTAN	Shodmon Mirzoev Dr. Farzona Rajabova Jamila Saidova
		2	EPIDEMIOLOGICAL SURVEY OF BOVINE TUBERCULOSIS IN RURAL TAJIKISTAN: DIAGNOSIS AND CONTROL STRATEGIES	Dr. Suhrob Safarov Dr. Gulnara Sharipova
		3	CONTROL OF BRUCELLOSIS IN DAIRY CATTLE: VACCINATION EFFORTS IN EGYPTIAN GOVERNORATES	Prof. Dr. Hossam Eldin Mahmoud Ahmed Zaki Assis. Prof. Dr. Mona El-Sayed
		4	AVIAN INFLUENZA MONITORING AND BIOSECURITY PRACTICES IN POULTRY FARMS OF EGYPT	Dr. Faten Abdelrahim Mohamed Saber
		5	TICK-BORNE DISEASES IN IRANIAN SHEEP FLOCKS: MOLECULAR DIAGNOSIS AND CONTROL MEASURES	Prof. Dr. Hassan Shirazi Assis. Prof. Dr. Sara Foroughi Dr. Mohsen Farzi
		6	VETERINARY EDUCATION REFORM AND PRACTICAL TRAINING IN IRANIAN UNIVERSITIES	Dr. Sahar Kaviani Prof. Dr. Ali Akbar Dehghan Banadaki
		7	SURVEILLANCE OF ZONOTIC DISEASES AT THE WILDLIFE-LIVESTOCK INTERFACE IN WESTERN INDIA	Dr. Ramesh Gopalakrishnan Assis. Prof. Dr. Meera Nair
		8	EVALUATION OF TRYPANOSOMIASIS CONTROL PROGRAMS IN INDIAN DAIRY CATTLE	Prof. Dr. Priya Sreenivasan Dr. Bhaskar Rao Dr. Aparna Nair

ISCS IZMIR 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES March 6 – 8, 2026 IZMIR Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 6 Mart / March 6, 2026 / 15:30 – 17:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 13	Dr. Alessio Romano	1	PHOTOCATALYTIC WATER SPLITTING USING NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE	Assis. Prof. Dr. Afsaneh Ramezani Ali Jamshidi
		2	SYNTHESIS AND CATALYTIC PERFORMANCE OF NOVEL METAL-ORGANIC FRAMEWORKS FOR CO2 CONVERSION	Prof. Dr. Mahin Moradi Dr. Farshad Bakhtiari Nasrin Khatib
		3	A GREEN SYNTHESIS APPROACH TO BIODEGRADABLE POLYMERS FROM RENEWABLE FEEDSTOCKS	Dr. Priyanka Singh Manoj Raval
		4	ORGANIC-INORGANIC HYBRID PEROVSKITES FOR NEXT-GENERATION SOLAR CELLS: DESIGN AND STABILITY ANALYSIS	Dr. Sonal Mehra Ajay Bhargava
		5	SYNTHESIS OF FUNCTIONALIZED GRAPHENE OXIDE FOR ORGANIC DYE REMOVAL FROM WATER	Dr. Kavita Agarwal
		6	BIOCATALYTIC SYNTHESIS OF PHARMACEUTICAL INTERMEDIATES USING ENZYME IMMOBILIZATION STRATEGIES	Prof. Dr. Nour-eddine Bouziane Assis. Prof. Dr. Lamia Cherif Dr. Rachid Benyounes
		7	CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM ALLOYS IN AGGRESSIVE INDUSTRIAL ENVIRONMENTS	Prof. Dr. Hakim Khellaf Dr. Noor Ahmed
		8		

Contents

ABIOTIC STRESSES IN PLANTS AND ASTAXANTHIN	1
BİTKİLERDE ABİYOTİK STRESLER VE ASTAKSANTİN	2
IRON BIOFORTIFICATION IN CEREALS: FROM PLANT GENETICS TO PRECISION BREEDING STRATEGIES	11
BAZI ÇİLEK ÇEŞİTLERİNİN KALİTE ÖZELLİKLERİ VE FARKLI KURUTMA YÖNTEMLERİNİN KURU MADDE İÇERİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ	29
PEYNİR ÜRETen İŞLETMELERDE PEYNİR ALTI SUYUNUN DEĞERLENDİRİLMESİNE İLİŞKİN YAKLAŞIMLARIN EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ: BİR LİTERATÜR İNCELEMESİ	41
HEMŞİRELİK BAKIMINDA DİJİTAL İKİZ (DIGİTAL TWIN) TEKNOLOJİSİ: BAKIM HATALARINI ÖNLEME VE GELECEK PROJEKSİYONU	56
ALGORİTMİK ÖNYARGI VE ETİK: HEMŞİRELİKTE YAPAY ZEKANIN GÖRÜNMEYEN RİSKLERİ VE HASTA GÜVENLİĞİ	65
YAŞLI BİREYLERDE AROMATERAPİ KULLANIMI VE RUH SAĞLIĞI	75
DİYABETTE REİKİ KULLANIMI VE RUH SAĞLIĞI	80
TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MATERYAL (PCM) KULLANIMI	87
TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE ISI POMPASI KULLANIMI	97
AKILLI ENJEKSİYON KALIPLAMA SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ: MOBİL ENTEGRASYONLU İNSAN-MAKİNE ARAYÜZÜ (HMI) VE HASSAS KOVAN SICAKLIK KONTROLÜ	109
A VEHICLE DYNAMICS–BASED CONCEPTUALIZATION OF ACTIVE SAFETY SYSTEMS AS REAL-TIME BOUNDARY MANAGEMENT MECHANISMS	122
EVOLUTION FROM ACTIVE SAFETY SYSTEMS TO ADAS: A VEHICLE DYNAMICS AND SENSOR FUSION–BASED SYSTEM-LEVEL REVIEW	133
FREN BALATALARINDA ARAMİD ve CAM ELYAFLI TEKSTİL KATMANLARININ SÜRTÜNME STABİLİTESİ ve AŞINMA PERFORMANSINA ETKİSİ	144
PET BAZLI OTOMOTİV KOLTUK KUMAŞINDA UYGULANAN HALOJENLİ ve HALOJENSİZ ALEV GECİKTİRİCİ BİTİM İŞLEMLERİNİN YANICILIK ve DUMAN PERFORMANSINA ETKİLERİ	153
MODIFIED-ATMOSPHERE (NITROGEN-FLUSHED) PACKAGING AND QUALITY EVOLUTION OF EXTRUDED SNACKS DURING STORAGE	160
JELKOT KAPLI CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİTMALZEMENİN YÜZEY DAYANIMLARININ İNCELENMESİ	162
MOBİLYA SEKTÖRÜNDE KAPASİTE PLANLAMA VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ANALİZİ: ANKARA ÖRNEĞİ	172
ATIK TETRAPAK AMBALAJLAR VE DOĞAL AHŞAP KAPLAMALARIN KOMBİNASYONU İLE TUTKALSIZ KOMPOZİT PANEL GELİŞTİRİLMESİ	182
GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE GERÇEK VE SİMÜLASYON TABANLI TESİSLERDE PERFORMANS ANALİZİ	193
SYNTHESIS OF MOFS@COTTON MATERIALS AS PHOTOCATALYST	209
NANO PEKTİNİN YAPISAL, KOLLOİDAL VE FOTO-DUYARLI MIS ARAYÜZEY DAVRANIŞININ ÇOK YÖNLÜ KARAKTERİZASYONU	215

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM VE SATHİ KAPLAMANIN FAYDA–MALİYET ANALİZLERİYLE ÖRNEK BİR YOL KESİMİ ÜZERİNDEN KARŞILAŞTIRILMASI	216
1975 ÖNCESİ İNŞA EDİLEN BETONARME BİR YAPININ FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ.....	217
06 ŞUBAT 2023 DEPREMLERİNİN ARDINDAN MALATYA'DAKİ BETONARME YAPILARIN YAPISAL DÜZENSİZLİKLER AÇISINDAN İNCELENMESİ	226
FARKLI İŞLEMLER GÖRDÜKTEN SONRA YÜZEYLERİNE TEK VE ÇİFT KOMPOZİT PARKE VERNİKLERİ UYGULANMIŞ ADİ DİŞBUDAK ODUNUNDA EV İÇİ KİMYASALINA MARUZ KALMANIN RENK PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİLERİ	237
PAMUK KUMAŞLARIN ZERDEÇAL TOZU VE ŞAP MADDESİYLE BOYANMASI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA.....	248
ADAPTIVE REUSE OF HISTORICAL BUILDINGS IN BAKU: CONTEMPORARY CHALLENGES AND INNOVATIVE SOLUTIONS	255
INTEGRATING TRADITIONAL AZERBAIJANI DESIGN PRINCIPLES INTO CONTEMPORARY URBAN HOUSING	256
SUSTAINABLE FLOOD-RESISTANT ARCHITECTURE FOR BANGLADESH'S GROWING DELTA REGIONS ...	257
URBAN DENSIFICATION AND GREEN SPACE PRESERVATION IN DHAKA: DESIGN STRATEGIES AND POLICY APPROACHES	258
INTEGRATING MODULAR CONSTRUCTION WITH MALAYSIAN VERNACULAR ARCHITECTURE: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES	259
TROPICAL ENVIRONMENTAL RESPONSIVENESS IN MALAYSIAN UNIVERSITY CAMPUS DESIGN	260
REHABILITATION OF OTTOMAN-ERA BUILDINGS IN SKOPJE: HISTORICAL ANALYSIS AND CONTEMPORARY CONSERVATION	261
URBAN TRANSFORMATION AND SOCIAL INCLUSION IN POST-SOCIALIST SKOPJE: PUBLIC SPACE REDESIGN.....	262
RENEWABLE ENERGY INTEGRATION IN SMART GRIDS: CHALLENGES AND SOLUTIONS IN PAKISTAN ..	263
DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR FAULT DETECTION IN HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION LINES	264
PHOTOVOLTAIC SYSTEM PERFORMANCE OPTIMIZATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN EGYPTIAN DESERTS	265
DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SMART ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE IN CAIRO	266
ANALYSIS OF MICROGRID STABILITY UNDER VARIABLE LOAD AND GENERATION CONDITIONS IN KABUL	267
EFFICIENT POWER CONVERTER DESIGN FOR RURAL ELECTRIFICATION IN AFGHANISTAN	268
WIRELESS COMMUNICATION FRAMEWORKS FOR REMOTE HEALTH MONITORING IN RURAL AFGHANISTAN	269
DESIGN AND TESTING OF FAULT-TOLERANT MOTOR DRIVES FOR INDUSTRIAL AUTOMATION	270
AI-POWERED IMAGE RECOGNITION TECHNOLOGIES FOR CIVIL INFRASTRUCTURE MONITORING IN KABUL	271
EVALUATING THE IMPACT OF HEALTH EDUCATION PROGRAMS ON DIABETES PREVENTION IN IRANIAN COMMUNITIES.....	272

GENETIC SCREENING AND COUNSELING FOR HEREDITARY CANCERS: PRACTICES AND CHALLENGES IN IRAN	273
STRENGTHENING MATERNAL HEALTHCARE ACCESS IN LOW-RESOURCE NIGERIAN SETTINGS.....	274
BURDEN OF MALARIA AND COMMUNITY RESPONSES TO VECTOR CONTROL IN RURAL NIGERIA.....	275
REFORMING MEDICAL EDUCATION IN ALBANIA: COMPETENCY-BASED CURRICULA AND TEACHING STRATEGIES	276
CHALLENGES IN IMPLEMENTING ELECTRONIC HEALTH RECORDS (EHR) SYSTEMS IN ALBANIAN HOSPITALS.....	277
PREVALENCE OF CARDIOVASCULAR RISK FACTORS AMONG UNIVERSITIES' STUDENTS IN MONGOLIA	278
SUSTAINABLE OLIVE CULTIVATION PRACTICES AND THEIR IMPACT ON SOIL HEALTH IN TUNISIA.....	279
WATER MANAGEMENT STRATEGIES FOR IRRIGATED AGRICULTURE IN SEMI-ARID TUNISIAN REGIONS	280
IMPROVING SORGHUM YIELD THROUGH GENETIC DIVERSITY AND AGROECOLOGICAL PRACTICES IN ETHIOPIA.....	281
INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND BIOPESTICIDES IN ETHIOPIAN HORTICULTURE	282
PRECISION AGRICULTURE APPLICATIONS IN WINTER WHEAT PRODUCTION IN RUSSIA	283
RUSSIAN GRASSLAND MANAGEMENT: CONSERVATION, CARBON SEQUESTRATION, AND LIVESTOCK PRODUCTIVITY	284
MODERN DESERT FARMING TECHNIQUES IN THE ARABIAN PENINSULA: CHALLENGES AND PROSPECTS	285
RECLAIMING MARGINAL LANDS FOR AGRICULTURE IN ARID REGIONS OF THE ARAB WORLD.....	286
DEVELOPMENT AND PHARMACOKINETIC EVALUATION OF HERBAL ANTIOXIDANT FORMULATIONS FOR CHRONIC DISEASE MANAGEMENT	287
CURRENT CHALLENGES IN ANTIMICROBIAL STEWARDSHIP PROGRAMS IN ALGERIAN HOSPITAL PHARMACY PRACTICE	288
NICOTINE ADDICTION AND PHARMACOLOGICAL INTERVENTIONS AMONG SYRIAN YOUTH: A CROSS-SECTIONAL STUDY.....	289
EVALUATION OF TRADITIONAL HERBAL DRUG USE IN PHARMACEUTICAL PRACTICE IN SYRIA.....	290
CLINICAL OUTCOMES OF MULTI-DRUG THERAPY FOR TUBERCULOSIS PATIENTS IN SENEGAL: A PHARMACY-BASED COHORT STUDY	291
PHARMACOVIGILANCE AND ADVERSE DRUG REACTION REPORTING SYSTEMS IN SENEGALESE HOSPITALS.....	292
EVALUATION OF PHARMACOGENOMIC TESTING PRACTICES IN AZERBAIJANI COMMUNITY PHARMACIES.....	293
PARASITIC INFESTATIONS IN SMALL RUMINANTS: CHALLENGES FOR RURAL LIVESTOCK FARMERS IN TAJIKISTAN.....	294
CONTROL OF BRUCELLOSIS IN DAIRY CATTLE: VACCINATION EFFORTS IN EGYPTIAN GOVERNORATES	295
AVIAN INFLUENZA MONITORING AND BIOSECURITY PRACTICES IN POULTRY FARMS OF EGYPT.....	296

TICK-BORNE DISEASES IN IRANIAN SHEEP FLOCKS: MOLECULAR DIAGNOSIS AND CONTROL MEASURES	297
VETERINARY EDUCATION REFORM AND PRACTICAL TRAINING IN IRANIAN UNIVERSITIES.....	298
SURVEILLANCE OF ZOO NOTIC DISEASES AT THE WILDLIFE-LIVESTOCK INTERFACE IN WESTERN INDIA	299
EVALUATION OF TRY PANOSOMIASIS CONTROL PROGRAMS IN INDIAN DAIRY CATTLE.....	300
PHOTOCATALYTIC WATER SPLITTING USING NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE	301
A GREEN SYNTHESIS APPROACH TO BIODEGRADABLE POLYMERS FROM RENEWABLE FEEDSTOCKS..	302
ORGANIC-INORGANIC HYBRID PEROVSKITES FOR NEXT-GENERATION SOLAR CELLS: DESIGN AND STABILITY ANALYSIS	303
SYNTHESIS OF FUNCTIONALIZED GRAPHENE OXIDE FOR ORGANIC DYE REMOVAL FROM WATER.....	304
BIOCATALYTIC SYNTHESIS OF PHARMACEUTICAL INTERMEDIATES USING ENZYME IMMOBILIZATION STRATEGIES	305
CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM ALLOYS IN AGGRESSIVE INDUSTRIAL ENVIRONMENTS.....	306

ABIOTIC STRESSES IN PLANTS AND ASTAXANTHIN

Prof. Dr., MELEK EKINCI

Atatürk University,
ekincim@tauni.edu.tr - 0000-0002-7604-3803

Assoc. Prof. Dr., ESMA YIGIDER

Atatürk University,
esma.yigider@atauni.edu.tr- 0000-0002-6896-0193

Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM

Atatürk University,
ertanyil@tauni.edu.tr - 0000-0003-3369-0645

Prof. Dr., MURAT AYDIN

Atatürk University,
maydin@tauni.edu.tr - 0000-0003-1091-0609

ABSTRACT

Changing climate and soil conditions worldwide are particularly affecting agricultural production. These adverse factors reduce plant growth and development, and consequently, yield and quality. This decline leads to significant economic losses. In agriculture, abiotic stresses (salinity, drought, temperature, UV and heavy metal) cause important damage to plants. Therefore, researchers have focused on applications that increase stress tolerance or mitigate stress damage. These include various fertilizers, hormones, enzymes, etc., and are generally called biostimulants because they increase plant growth and development. Astaxanthin, considered a good biostimulant candidate in recent years, is one of them. Astaxanthin is a carotenoid pigment known as one of the most effective natural antioxidants. It plays an active role in photo oxidative stress management, lipid peroxidation, and stress tolerance in plants. Information of astaxanthin regarding the effects of stress on plants is insufficient, and the number of studies conducted on this subject is quite limited. This study provides general information on the effects and uses of astaxanthin in plants under abiotic stress conditions, based on existing research.

Keywords: astaxanthin, salinity, drought, stress, tolerance, biostimulant

BİTKİLERDE ABİYOTİK STRESLER VE ASTAKSANTİN

Prof. Dr., MELEK EKİNCİ

Atatürk Üniversitesi,
ekincim@tauni.edu.tr - 0000-0002-7604-3803

Doç. Dr., ESMA YİĞİDER

Atatürk Üniversitesi,
esma.yigider@atauni.edu.tr- 0000-0002-6896-0193

Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM

Atatürk Üniversitesi,
ertanyil@tauni.edu.tr - 0000-0003-3369-0645

Prof. Dr., MURAT AYDIN

Atatürk Üniversitesi,
maydin@tauni.edu.tr - 0000-0003-1091-0609

ÖZET

Dünya genelinde değişen iklim ve toprak koşulları, özellikle tarımsal üretimi etkilemektedir. Bu olumsuz faktörler, bitki büyümesini ve gelişimini, dolayısıyla verimi ve kaliteyi azaltmaktadır. Bu düşüş, önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Tarımda, abiyotik stresler (tuzluluk, kuraklık, sıcaklık, UV ve ağır metal) bitkilere önemli zararlar vermektedir. Bu nedenle, araştırmacılar stres toleransını artıran veya stres hasarını hafifleten uygulamalara odaklanmıştır. Bunlar arasında çeşitli gübreler, hormonlar, enzimler vb. bulunmakta ve genellikle bitki büyümesini ve gelişimini artırdıkları için biyostimülanlar olarak adlandırılmaktadırlar. Son yıllarda iyi bir biyostimülan adayı olarak kabul edilen astaksantin de bunlardan biridir. Astaksantin, etkili doğal antioksidanlardan biri olarak bilinen bir karotenoid pigmentidir. Bitkilerde foto-oksidatif stres yönetimi, lipid peroksidasyonu ve abiyotik stres toleransında aktif rol oynar. Astaksantin bitkiler üzerindeki stres etkileriyle ilgili bilgiler yetersizdir ve bu konuda yapılan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, mevcut araştırmalara dayanarak, astaksantin bitkilerde abiyotik stres koşulları altındaki etkileri ve kullanımları hakkında genel bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: astaksantin, tuzluluk, kuraklık, stres, tolerans, biyostimülan

1. INTRODUCTION

In agricultural production, plants encounter various adverse factors. The most significant of these are abiotic stresses caused by changing climate conditions. Environmental factors such as high and low temperatures, drought, UV radiation, salinity and heavy metals disrupt cellular balance and plant metabolism, thereby restricting plant growth. In response to these stressors,

plants develop many defense reactions to survive, such as slowing down the rate of photosynthesis, closing their stomata to prevent water loss, and synthesizing various molecules to balance osmotic pressure.

Astaxanthin (Ast) is a carotenoid widely used to provide the pink color in various seafood aquacultures, and synthetic Ast is also heavily used in the global market. However, recently, natural sources of the pigment such as the red yeast *Phaffia rhodozyma*, the green algae *Haematococcus pluvialis* and shellfish are being evaluated. Astaxanthin is a pigment belonging to the xanthophyll family, which are oxygenated derivatives of carotenoids, and its synthesis in plants is derived from lycopene. Astaxanthin also possesses antioxidant properties similar to those of α -tocopherol or β -carotene. It is attributable to its antioxidant activity, it is also considered to have the potential to protect the organism against certain diseases and disorders in humans (Higuera-Ciapara et al., 2006). It has been noted, Ast has higher antioxidant activity than β -carotene and is approximately a thousand times more effective than vitamin E. It is naturally found in many marine organisms such as trout, shrimp, and microalgae, as well as in some fungi, bacteria, and flowering plants, protecting hosts against environmental stress and adverse conditions (Zhang et al., 2020). Under stress, various green algae accumulate secondary ketocarotenoids such as Ast. Astaxanthin accumulation increases cellular resistance to oxidative stress caused by adverse conditions such as excessive UV-B radiation, light and nutritional stress, thus leading to higher cell survival (Lemoine and Schoefs, 2010). Information regarding the effects and uses of Ast in plants is insufficient, but it is known that it may have significant effects through certain mechanisms.

The most significant effect of abiotic stress in plants is the excessive accumulation of reactive oxygen species (ROS) that damage cells. In this situation, the plant's defense mechanism can be activated by the production of powerful antioxidants such as Ast to combat the resulting oxidative stress. Therefore, Ast is a molecule that should be considered in plant stress tolerance. However, studies in this area are insufficient. While information on the effect, mechanism of action, and use of Ast against various stresses is lacking, this study provides some information on its potential effects and uses.

2. ABIOTIC STRESS

Plants are subjected to a great deal of stress due to environmental factors. Agricultural production, in particular, is meaningfully affected by salinity, drought, UV radiation, heavy metals, and heat stress.

Salinity is one of the most common abiotic stresses encountered in agricultural production. It is a highly damaging factor due to the osmotic stress and ionic toxicity it causes in plants (Arif et al., 2020). High salt concentration in the soil solution reduces the plant's water potential, hindering water uptake and causing physiological drought. Furthermore, the accumulation of Na and Cl ions within the cells prevents the transport of essential nutrients such as K, disrupting the metabolic process (Sheldon et al., 2017; Arif et al., 2020). This ionic imbalance and water loss lead to a decrease in photosynthetic capacity, ROS accumulation, damage to the cell membrane, and consequently tissue death, resulting in shortened plant height, chlorosis, and

reduced leaf, shoot, and root development. All of these cause significant crop losses, resulting in economic damage to the producer (Majeed and Muhammad, 2019; Shahid et al., 2020).

Drought stress, another abiotic stress factor, reduces water potential in plants and affects various morphological, physiological, biochemical, and molecular processes. The stress caused by decreasing water levels in the soil, which leads to the transport of ABA synthesized in the roots to the leaves and the activation of ion channels causing stomatal closure, prevents water loss through transpiration but also reduces photosynthetic activity by restricting CO₂ uptake (Liu et al., 2022). Dehydration, protein degradation, lipid peroxidation, and cell membrane damage occurring in plant cells lead to excessive ROS accumulation (Farooq et al., 2009). Osmotic regulation occurs through the synthesis of antioxidant enzymes such as CAT and SOD, and osmoprotective molecules such as glycine betaine and proline, in response to oxidative damage caused by increased ROS levels (Farooq et al., 2009; Iqbal, 2018). In the long term, drought stress leads to deterioration of the root/shoot ratio, reduction in leaf area, breakdown of chlorophylls, and impaired ATP synthesis, resulting in wilting and plant death (Farooq et al., 2009; Anjum et al., 2011).

Increased heavy metal accumulation in water and soil due to industrialization, mining, and intensive agricultural activities is another factor causing damage to crop production. Toxic metals such as As, Cd, Cr, and Pb are absorbed by plant roots via the transport system and cause serious physiological and biochemical disorders in cells (Proshad et al., 2018; Madhu and Sadagopan, 2020). Heavy metals cause lipid peroxidation in the cell membrane and structural damage in organelles such as chloroplasts and mitochondria. By reducing chlorophyll synthesis and decreasing stomatal conductivity, they disrupt photosynthesis and respiration, leading to reduced plant growth and yield losses (Nowicka, 2022). Furthermore, oxidative stress occurs due to increased ROS associated with heavy metal accumulation. The activity of antioxidant defense enzymes such as APX, CAT, and SOD increases, leading to DNA damage and protein degradation at the cellular level, resulting in morphological, physiological, and molecular stress responses in the plant (Syta et al., 2013; Mansoor et al., 2023).

In plants, UV stress, particularly caused by UV-B radiation, disrupts cellular homeostasis by leading to excessive ROS production in organelles (mitochondria and chloroplasts etc.), resulting in protein degradation, lipid peroxidation, and nucleic acid damage (Sharma et al., 2017; Pathak et al., 2019). Furthermore, under stress, the plant attempts to minimize oxidative damage through the activation of antioxidant enzymes, and tries to maintain the functionality of the photosynthetic apparatus, resulting in morphological changes such as height decrease and leaf thickening (Pathak et al., 2019).

Heat stress in plants is a stress factor that occurs when temperatures below or above the optimum temperature range for plants cause cellular and physiological damage (Hasanuzzaman et al., 2013). Increased membrane fluidity, ion leakage, and protein degradation due to high temperatures damage photosystem II, reducing photosynthetic activity. Disruptions in electron transport lead to ROS accumulation and oxidative stress. Plants attempt to protect themselves in this situation by activating antioxidant enzymes and heat shock proteins (Hasanuzzaman et al., 2013; Djanaguiraman et al., 2018). At low temperatures, membrane rigidity increases,

enzyme activity slows down, and the resulting ice crystals damage the cell structure. During this process, plants try to adapt by altering their membrane lipid composition and accumulating osmoprotectants (Sardoei and Fazeli-Nasab, 2025). All these processes lead to a decrease in plant growth and yield.

3. ASTAXANTHIN ON ABIOTIC STRESSES

The effect of Ast on abiotic stresses in plants has not yet been clearly established. It is known that increased endogenous Ast in response to stress provides a protective mechanism for the plant, and significant benefits are also obtained through exogenous applications. However, the number of studies, particularly those focusing on exogenous applications, is quite limited. This study presents examples from research conducted by different researchers on various plants, based on a literature review.

In plants, Ast can reduce the damage caused by excessive sunlight to cells by accumulating in areas close to the cell wall and absorbing light at levels too high for chlorophyll to handle, thus converting it into heat and filtering the light and by protecting chlorophyll breakdown and maintaining the photosynthesis mechanism (He et al., 2020; Nair et al., 2023; Nishida et al., 2023). It also plays an effective role against ROS that form in the cells of stressed plants. Its long conjugated double bond chain captures and neutralizes ROS. In addition, it neutralizes singlet oxygen without damaging the plant's DNA and proteins. Astaxanthin has the ability to extend to both sides of the cell membrane, physically strengthening it under stress and preventing lipid peroxidation (Song et al., 2022; Nishida et al., 2023; Mekawy et al., 2024; Shah et al., 2025).

Indeed, the investigations carried out, it has been observed that mangrove species living in high-salinity environments accumulate Ast in their leaves to protect against high salt levels, thus providing the plant with a protective mechanism against excessive salinity (Chowdhury et al., 2017). Studies based on this naturally occurring adaptive ability in plants have shown that external application of Ast also produces similar tolerance-enhancing effects. Soaking salt-sensitive rice seeds in Ast resulted in Ast-treated plants returning to levels similar to those of unstressed plants. In Ast-untreated plants, hydrogen peroxide (H₂O₂), malondialdehyde (MDA), and electrolyte leakage rate concentrations decreased, while leaf catalase, peroxidase, and ascorbate peroxidase activities increased. Under salt stress, leaf Na⁺ concentration and Na⁺/K⁺ ratio decreased with Ast application, and the expression of OsBHY, OsSOS1, OsNHX1, and OsHKT1;5 genes increased. General, it was stated that seed soaking in Ast induced salinity tolerance in salt-sensitive rice varieties by reducing oxidative stress damage and increasing shoot Na⁺/K⁺ balance; so, seed soaking systems using Ast could function as a good strategy to improve the cultivation of salt-sensitive rice varieties in saline soils (Mekawy et al., 2024). This effect of Ast, which underlies stress tolerance through increased antioxidant capacity and decreased lipid peroxidation, has also been supported in a study conducted on strawberry plants. A study investigating the effects of Ast (0, 5, 10, 50, 100, and 200 mol/L) on the growth and resistance of strawberry tissue culture seedlings under salinity found that, compared to control groups, treatment with 5, 10, 50, and 100 mol/L Ast increased chlorophyll, ascorbic acid, and catalase (CAT) antioxidant capacity, while decreasing MDA. This suggests that Ast may improve the physiological activity and increase salt tolerance of strawberry

seedlings (Zhong et al., 2018). Current research shows that nanotechnological approaches are also highly effective in increasing the effectiveness of Ast, and it is stated that the nanotechnological form of Ast can increase tolerance to salt stress. Indeed, Ast gold nanoparticles (Ast-AuNPs), synthesized using Ast and chloroauric acid, stimulated tetrapyrrole biosynthesis while reducing oxidative stress caused by high salinity in 10-day-old rice seedlings grown hydroponically under high salinity (150 mM NaCl) stress for seven days (Song et al., 2022). Astaxanthin's role in salt stress tolerance is also due to its activation of enzymes and various genes, and its modification of gene pathways. Furthermore, proline, MDA, and H₂O₂ levels were significantly reduced, while antioxidant enzyme activities and the expression of ROS scavenging genes in the leaves were increased with the addition of Ast-AuNPs under salt stress. The researchers suggest that Ast-AuNPs may advantage rice seedlings in coping with high salt stress by stimulating scavenging ROS, tetrapyrrole biosynthesis, and enhancing antioxidant activity (Song et al., 2022).

The multifaceted role of Ast in the plant defense system is also relevant in terms of heavy metal stress and heavy metal accumulation, which are other significant threats besides salinity. For example, it was determined that 100 µM Ast alleviated Cd toxicity in wheat seedlings by increasing carotenoid content, photosynthesis, and total antioxidant capacity, growth, reducing MDA and H₂O₂ levels, Cd accumulation, and increasing Cd tolerance in wheat plants by promoting the expression of genes related to detoxification and photosynthesis (Ozavize et al., 2024). The success of Ast in heavy metal resistance has been confirmed not only through external applications but also by genetically enriching the plant with this substance. In one study, when comparing biologically Ast-enriched tobacco (T-ATX) and wild-type (SNN) tobacco seedlings, T-ATX plants exhibited higher root length, plant height, leaf area, and biomass under Pb stress compared to SNN plants, and showed higher chlorophyll levels, antioxidant enzyme activities, non-enzymatic antioxidants and photosynthetic efficiency (Du et al., 2025). It was determined that the Pb content and Pb translocation coefficient in various organs of the tobacco plant were lower in Ast-enriched tobacco (T-ATX), and numerous genes and metabolites associated with antioxidant defense mechanisms, carotenoid metabolism, Pb ion transport, detoxification pathways, and plant hormone signal transduction were significantly upregulated in T-ATX tobacco plants (Du et al., 2025). In the T-ATX tobacco genotype, endogenous ATX enriched with ATX significantly improved the plant's stress tolerance by strengthening the maintaining cellular structural integrity, antioxidant protection system, reducing Pb absorption and translocation, and upregulating detoxification and connected signaling pathways (Du et al., 2025).

Furthermore, the use of nanotechnology in obtaining nanotechnological Ast forms has also been shown to have tolerance-enhancing effects in plants under heavy metal stress. For example, when the effect of Ast nanoparticles (AstNPs) on mitigating Cd stress in wheat was investigated, it was determined that hydroponic application of AstNPs (100 mg L⁻¹) to Cd-affected wheat plants significantly increased shoot dry weight, shoot height, N and P concentration compared to untreated seedlings. Furthermore, a decrease in Cd translocation was observed in AstNPs-treated plants, resulting in a reduced Na⁺ content and an improved nutrient profile (N, P, K⁺, and Ca²⁺) (Zeshan et al., 2022). It was determined that AstNPs restrict the

translocation of Cd transporter genes (TaHMA3 and TaHMA2) to the above-ground parts of the plant and activate the antioxidant system by triggering the expression of TaSOD and TaPOD genes, thus protecting plants from oxidative damage (Zeshan et al., 2022). Application of AstNPs improved the physicochemical profiles of stressed wheat plants by maintaining nutrient uptake and ionic homeostasis in Cd-affected wheat plants (Zeshan et al., 2022). Similarly, it has been determined that Ast in the form of gold (Au) nanoparticles (Ast-AuNPs) can more effectively alleviate Cd toxicity in rice plants compared to Ast alone (Dai et al., 2021). When Ast-AuNPs were added to the medium, it was found to significantly reduce Cd levels in rice roots and leaves, restore chlorophyll biosynthesis, and alleviate Cd-induced oxidative stress (Dai et al., 2021). In rice under Cd stress, Ast-AuNPs reduced the content of superoxide anion (O_2^-), MDA, and H_2O_2 , while increasing the activity of SOD, POD, and CAT (Dai et al., 2021). It was determined that Ast-AuNPs supplementation inhibited the gene expression of Cd-induced metal transporter genes (OsIRT1, OsIRT2, OsNramp1, OsNramp5, OsHMA2, AND OsHMA3,) in rice roots (Dai et al., 2021).

There is strong evidence that Ast may also be an effective defense component against various abiotic stressors. Due to its chemical structure and high conjugated double bond system, Ast has a much higher single oxygen scavenging and free radical scavenging capacity than other carotenoids. While the protective effects of Ast on plants under salt and heavy metal stress are supported by concrete data in the literature, its interaction with other stresses in higher plants is still limited. It is well known that Ast acts as a strong light-protective agent against UV radiation in microalgae and protects cellular integrity under drought-induced dehydration conditions.

4. CONCLUSION

In summary, the existing literature reveals that Ast plays a multifaceted and critical role in enhancing tolerance of abiotic stress in plants. This powerful carotenoid, which functions as a protective shield in its natural habitat, appears to be able to build resistance against various environmental threats through external application to seeds and plants, and through its transfer to agricultural products using modern nanotechnology methods.

REFEFENCES

- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., and Lei, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032, 2011.
- Arif, Y., Singh, P., Siddiqui, H., Bajguz, A., and Hayat, S. Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 64-77, 2020.
- Chowdhury, G. R., Agarwal, S., and Mitra, A. Astaxanthin Pattern in Mangroves: A Case of Species-Specificity. *Biomed. J. Sci. Tech. Res*, 10, 2017.
- Dai, S., Wang, B., Song, Y., Xie, Z., Li, C., Li, S., and Jiang, M. Astaxanthin and its gold nanoparticles mitigate cadmium toxicity in rice by inhibiting cadmium translocation and uptake. *Science of the Total Environment*, 786, 147496, 2021.

- Djanaguiraman, M., Boyle, D. L., Welti, R., Jagadish, S. V. K., and Prasad, P. V. V. Decreased photosynthetic rate under high temperature in wheat is due to lipid desaturation, oxidation, acylation, and damage of organelles. *BMC plant biology*, 18(1), 55, 2018.
- Du, Z., Liang, M., Wang, X., Liu, Y., Du, S., Shi, D., and Xue, J. Astaxanthin biofortification enhances tobacco tolerance to lead stress through boosting antioxidant defense, reducing Pb accumulation, and modulating detoxification pathways. *Journal of Advanced Research*, 2025.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., and Basra, S. M. *Plant drought stress: effects, mechanisms and management*. In Sustainable agriculture (pp. 153-188). Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Roychowdhury, R., and Fujita, M. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*, 14(5), 9643-9684, 2013.
- He, B., Hou, L., Zhang, F., Cong, X., Wang, Z., Guo, Y., and Zang, X. Ultrastructural changes of *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyta) in process of astaxanthin accumulation and cell damage under condition of high light with acetate. *Algae*, 35(3), 253-262, 2020.
- Higuera-Ciapara, I., Félix-Valenzuela, L., and Goycoolea, F. M. Astaxanthin: a review of its chemistry and applications. *Critical reviews in food science and nutrition*, 46(2), 185-196, 2006.
- Iqbal, M. J. Role of osmolytes and antioxidant enzymes for drought tolerance in wheat. *Global wheat production*, 51, 51-66, 2018.
- Lemoine, Y., and Schoefs, B. Secondary ketocarotenoid astaxanthin biosynthesis in algae: a multifunctional response to stress. *Photosynthesis research*, 106(1), 155-177, 2010.
- Liu, H., Song, S., Zhang, H., Li, Y., Niu, L., Zhang, J., and Wang, W. Signaling transduction of ABA, ROS, and Ca²⁺ in plant stomatal closure in response to drought. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23), 14824, 2022.
- Madhu, P. M., and Sadagopan, R. S. Effect of heavy metals on growth and development of cultivated plants with reference to cadmium, chromium and lead—a review. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 16(3), 84-102, 2020.
- Majeed, A., and Muhammad, Z. *Salinity: a major agricultural problem—causes, impacts on crop productivity and management strategies*. In Plant abiotic stress tolerance: Agronomic, molecular and biotechnological approaches (pp. 83-99). Cham: Springer International Publishing, 2019.
- Mansoor, S., Ali, A., Kour, N., Bornhorst, J., AlHarbi, K., Rinklebe, J., and Chung, Y. S. Heavy metal induced oxidative stress mitigation and ROS scavenging in plants. *Plants*, 12(16), 3003, 2023.

- Mekawy, A. M. M., Assaha, D. V., Li, J., and Ueda, A. Astaxanthin application enhances salinity tolerance in rice seedlings by abating oxidative stress effects and enhancing Na⁺/K⁺ homeostatic balance. *Plant Growth Regulation*, 103(3), 609-623, 2024.
- Nair, A., Ahirwar, A., Singh, S., Lodhi, R., Lodhi, A., Rai, A., and Vinayak, V. Astaxanthin as a king of ketocarotenoids: structure, synthesis, accumulation, bioavailability and antioxidant properties. *Marine drugs*, 21(3), 176, 2023.
- Nishida, Y., Berg, P. C., Shakersain, B., Hecht, K., Takikawa, A., Tao, R., and Maoka, T. Astaxanthin: past, present, and future. *Marine Drugs*, 21(10), 514, 2023.
- Nowicka, B. Heavy metal-induced stress in eukaryotic algae—mechanisms of heavy metal toxicity and tolerance with particular emphasis on oxidative stress in exposed cells and the role of antioxidant response. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 16860-16911, 2022.
- Ozavize, S. F., Qiu, C. W., and Wu, F. Astaxanthin induces plant tolerance against cadmium by reducing cadmium uptake and enhancing carotenoid metabolism for antioxidant defense in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 210, 108622, 2024.
- Pathak, J., Rajneesh, Ahmed, H., Singh, D. K., Singh, P. R., Kumar, D., and Sinha, R. P. Oxidative stress and antioxidant defense in plants exposed to ultraviolet radiation. *Reactive oxygen, nitrogen and sulfur species in plants: production, metabolism, signaling and defense mechanisms*, 371-420, 2019.
- Proshad, R., Kormoker, T., Mursheed, N., Islam, M. M., Bhuyan, M. I., Islam, M. S., and Mithu, T. N. Heavy metal toxicity in agricultural soil due to rapid industrialization in Bangladesh: a review. *International Journal of Advanced Geosciences*, 6(1), 83-88, 2018.
- Sardoei, A. S., and Fazeli-Nasab, B. Physiological and Molecular Mechanisms of Freezing in Plants. *Phyton* (0031-9457), 94(6), 2025.
- Shah, F. I., Imran, H., Akram, F., Khalid, T., and Shehzadi, S. Marine carotenoids: Unlocking advanced antioxidant mechanisms and therapeutic applications for oxidative stress. *Molecular Biotechnology*, 1-18, 2025.
- Shahid, M. A., Sarkhosh, A., Khan, N., Balal, R. M., Ali, S., Rossi, L., and Garcia-Sanchez, F. Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development. *Agronomy*, 10(7), 938, 2020.
- Sharma, S., Chatterjee, S., Kataria, S., Joshi, J., Datta, S., Vairale, M. G., and Veer, V. A review on responses of plants to UV-B radiation related stress. *UV-B Radiation: From Environmental Stressor to Regulator of Plant Growth*, 75-97, 2017.
- Sheldon, A. R., Dalal, R. C., Kirchhof, G., Kopittke, P. M., and Menzies, N. W. The effect of salinity on plant-available water. *Plant and Soil*, 418(1), 477-491, 2017.

- Song, Y., Zheng, C., Basnet, R., Li, S., Chen, J., and Jiang, M. Astaxanthin synthesized gold nanoparticles enhance salt stress tolerance in rice by enhancing tetrapyrrole biosynthesis and scavenging reactive oxygen species in vitro. *Plant Stress*, 6, 100122, 2022.
- Sytar, O., Kumar, A., Latowski, D., Kuczynska, P., Strzałka, K., and Prasad, M. N. V. Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. *Acta physiologiae plantarum*, 35(4), 985-999, 2013.
- Zeshan, A., Abdullah, M., Adil, M. F., Wei, D., Noman, M., Ahmed, T., and Shamsi, I. H. Improvement of morpho-physiological, ultrastructural and nutritional profiles in wheat seedlings through astaxanthin nanoparticles alleviating the cadmium toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 126511, 2022.
- Zhang, C., Chen, X., and Too, H. P. Microbial astaxanthin biosynthesis: recent achievements, challenges, and commercialization outlook. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(13), 5725-5737, 2020.
- Zhong, Y., Luo, Y., Ge, C., Mo, Q., Lin, Y. J., Luo, S., and Tang, H. R. (2018, February). Effect of astaxanthin on the growth and resistance of strawberry seedling under salt stress. In 2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017) (pp. 2139-2143). Atlantis Press.

IRON BIOFORTIFICATION IN CEREALS: FROM PLANT GENETICS TO PRECISION BREEDING STRATEGIES

Assoc. Prof. Dr., ESMA YIGIDER

Atatürk University,
esma.yigider@atauni.edu.tr- 0000-0002-6896-0193

Prof. Dr., MELEK EKINCI

Atatürk University,
ekincim@atauni.edu.tr - 0000-0002-7604-3803

Prof. Dr., MURAT AYDIN

Atatürk University,
maydin@atauni.edu.tr - 0000-0003-1091-0609

Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM

Atatürk University,
ertanyil@atauni.edu.tr - 0000-0003-3369-0645

ABSTRACT

Concerns about food and nutritional security are growing amid rapid global population growth and mounting pressure on agricultural systems. The world population has already surpassed 8 billion people, with a forecast of reaching approximately 9.6–9.8 billion by 2050, substantially increasing demand for nutrient-rich food production. Iron (Fe) deficiency is among the most prevalent micronutrient deficiencies globally, leading to anemia, impaired mental development, and reduced productivity, especially in developing regions. Consequently, crop Fe biofortification has emerged as a cost-effective and sustainable approach to increase the concentration and bioavailability of Fe in edible plant tissues. This review focuses on recent advances in plant genetics and molecular mechanisms involved in Fe uptake, transport, homeostasis, and storage, with an emphasis on major transporter families and regulatory networks. Through functional genomics, characterization of transcriptional regulation and signaling pathways in plant responses to Fe deficiency has improved, and mechanisms that initiate the mobilization of mineral reserves within plants are better understood. These insights have facilitated the adoption of precision breeding strategies, including marker-assisted selection, genomic selection, transgenic approaches, and genome editing. Despite significant advances, challenges persist, including genotype-dependent variation, limited mineral bioavailability due to antinutritional compounds, and complex gene-environment interactions that affect Fe accumulation. Combining multi-omics analyses with precision breeding platforms will be critical to overcoming these limitations. Overall, Fe biofortification represents a key junction of plant genetics and next-generation breeding, offering a promising strategy to combat hidden hunger by providing nutritionally enhanced crops.

Keywords: Biofortification, CRISPR/Cas9, Hidden Hunger, Iron, Sustainability

TAHILLARDA DEMİR BİYOFORTİFİKASYONU: BİTKİ GENETİĞİNDEN HASSAS ISLAH STRATEJİLERİNE

Doç. Dr., ESMA YİĞİDER

Atatürk Üniversitesi,

esma.yigider@atauni.edu.tr- 0000-0002-6896-0193

Prof. Dr., MELEK EKİNCİ

Atatürk Üniversitesi,

ekincim@atauni.edu.tr - 0000-0002-7604-3803

Prof. Dr., MURAT AYDIN

Atatürk Üniversitesi,

maydin@atauni.edu.tr - 0000-0003-1091-0609

Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM

Atatürk Üniversitesi,

ertanyil@atauni.edu.tr - 0000-0003-3369-0645

ÖZET

Küresel nüfus artışının hızlanması ve tarım sistemleri üzerindeki baskının artmasıyla birlikte gıda ve beslenme güvenliğine ilişkin endişeler giderek artmaktadır. Dünya nüfusu 8 milyarı aşmış olup, 2050 yılına kadar yaklaşık 9,6-9,8 milyara ulaşması öngörülmektedir; bu da besin açısından zengin gıda üretimine olan talebi önemli ölçüde artırmaktadır. Demir (Fe) eksikliği, küresel olarak en yaygın mikro besin eksikliklerinden biridir ve özellikle gelişmekte olan bölgelerde anemiye, bilişsel gelişim bozukluğuna ve verimlilik azalmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, bitkilerde Fe biyofortifikasyonu, yenilebilir bitki dokularında Fe konsantrasyonunu ve biyoyararlanımını artırmak için uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu inceleme, Fe alımında, taşınmasında, homeostazında ve depolanmasında rol oynayan bitki genetiği ve moleküler mekanizmalardaki son gelişmelere, özellikle de ana taşıyıcı ailelerine ve düzenleyici ağlara odaklanmaktadır. Fonksiyonel genomik yoluyla, bitkilerin Fe eksikliğine verdiği tepkilerde transkripsiyonel düzenleme ve sinyal yollarının karakterizasyonu iyileştirilmiş ve bitkilerde mineral rezervlerinin harekete geçirilmesini başlatan mekanizmalar daha iyi anlaşılmıştır. Bu bilgiler, marker destekli seleksiyon, genomik seleksiyon, transgenik yaklaşımlar ve genom düzenleme dahil olmak üzere hassas ıslah stratejilerinin benimsenmesini kolaylaştırmıştır. Önemli ilerlemelere rağmen, genotip bağımlı varyasyon, antinutrisyonel bileşikler nedeniyle sınırlı mineral biyoyararlanımı ve demir birikimini etkileyen karmaşık gen-çevre etkileşimleri gibi zorluklar devam etmektedir. Çoklu omik analizlerini hassas ıslah platformlarıyla birleştirmek, bu sınırlamaların üstesinden gelmek için kritik önem taşıyacaktır. Genel olarak, Fe biyofortifikasyonu, bitki genetiği ve yeni nesil ıslahın önemli bir kesişim noktasını temsil etmekte ve besin açısından zenginleştirilmiş ürünler sağlayarak gizli açlıkla mücadele için umut vadeden bir strateji sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyofortifikasyon, CRISPR/Cas9, Gizli Açlık, Demir, Sürdürülebilirlik

1. INTRODUCTION

According to the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, malnutrition is a global nutritional problem that encompasses insufficient energy intake and micronutrient deficiencies (FAO, 2023). Beyond undernutrition, malnutrition encompasses protein deficiencies and obesity, resulting in significant health and developmental consequences, particularly among pregnant women, children, and older adults (Mbuya et al. 2019; Tomasiewicz et al. 2024; Ebadi & Selamoglu, 2025). Micronutrient deficiencies, commonly termed "hidden hunger," are described by inadequate intake of critical vitamins and minerals, affecting billions globally (Kumar et al. 2023). Unlike overt hunger, hidden hunger often remains undetected because individuals may consume sufficient calories while lacking essential micronutrients required for proper physiological functioning (White & Broadley, 2009; Burchi et al. 2011). The burden of this problem is especially severe in low- and middle-revenue countries (LMICs), where food insecurity is exacerbated by agricultural inefficiencies and economic instability (Kunlure, 2025).

Among essential micronutrients, iron (Fe) is crucial for organisms, playing a key role in numerous metabolic processes (Shukla et al. 2018). In humans, Fe is an essential micronutrient that is tightly regulated and crucial for oxygen transport and energy metabolism. Its absorption and bioavailability are influenced by dietary factors (Wessling-Resnick, 2017). Fe deficiency is the leading reason of anemia worldwide and is associated with decreased cognitive development in children, slowed physical activity and work efficiency in adults, compromised immune function, and increased maternal and perinatal mortality rates (Lopez et al. 2016; Bahgat et al. 2022; Solberg & Reikvam, 2023; Leung et al. 2024; Obeagu, 2025). Chronic Fe deficiency can impair brain development and diminish overall quality of life, especially in at-risk populations (Korczak et al. 2024). In addition to its physical consequences, Fe deficiency imposes significant economic burdens on developing nations due to diminished labor productivity and increased healthcare expenditures (Hunt, 2002; Blank et al. 2019). In plants, Fe is equally vital, playing a fundamental role in chlorophyll synthesis, photosynthesis, and respiration (Rout & Sahoo, 2015). However, despite its prevalence in Earth's crust, the bioavailability of Fe in soils is frequently limited, particularly under calcareous and alkaline conditions, leading to inadequate Fe accumulation in cereal grains (Ramzani et al. 2016).

In developing regions, micronutrient insufficiency is linked to limited dietary diversity and the dominance of cereal and plant-based intakes that contain relatively low levels of bioavailable minerals compared with animal-based foods (Rawat et al. 2013). Furthermore, anti-nutritional substances such as phytic acid, protease inhibitors, lectins, alkaloids, tannins, oxalates, and fibers reduce mineral bioavailability by inhibiting intestinal absorption (Tadele, 2015; Ram et al. 2020; Abera et al. 2023). Processing operations, including polishing, milling, and pearling of cereals, further diminish micronutrient content by removing mineral-rich outer layers of the grain (White & Broadley, 2009). In addition to dietary and processing constraints, environmental factors, including elevated soil pH, high temperatures, low organic matter, and

inadequate soil fertility management, reduce Fe availability for crops in calcareous soils, thereby limiting Fe accumulation in these crops (Ramzani et al. 2016). Given the global frequency of Fe deficiency, biofortification of staple cereals is an applicable strategy to increase mineral intake and improve human nutrition (Naveed et al. 2020).

Despite substantial progress in understanding Fe metabolism in plants, notable gaps remain in translating molecular insights into stable, high-yield biofortified grain varieties. The intricate regulation of Fe uptake, transport, storage, and grain loading, together with genotype × environment interactions, poses significant hurdles for breeding efforts. A comprehensive synthesis of recent advances in plant genetics and precision breeding techniques is crucial to accelerate the development of nutritionally improved cereal crops. Confronting these challenges is essential to enhancing crop nutritional quality and promoting global food and nutritional safety in a sustainable approach.

2. IRON METABOLISM IN PLANTS

2.1. Iron Uptake and Transport Mechanisms in Plants

Plants have improved two separate strategies to obtain Fe from the rhizosphere, overcoming its extremely low solubility in aerobic soils (Kobayashi & Nishizawa, 2012). Non-graminaceous plants employ Strategy I, characterized by coordinated induction of rhizosphere acidity, ferric reduction, and ferrous transport (Pereira et al. 2014). The H⁺-ATPase AHA2 is the main isoform responsible for proton excretion, which lowers soil pH and increases the solubility of ferrous Fe (Morrissey & Guerinot, 2009). After solubilization, the membrane-bound ferric reduction oxidase 2 (FRO2) reduces Fe(III) to the more soluble Fe(II) (Liang, 2022). Ferrous ions are then transferred into root epidermal cells by the divalent metal transporter iron-regulated transporter 1 (IRT1) (Sathyaseelan et al. 2025).

In contrast, Strategy II plants, including grasses, produce mugineic acid (MAs) family phytosiderophores (PS) that strongly bind to Fe(III) (Yoneyama, 2021). The production of MAs and the uptake of MA-chelated Fe are significantly increased under Fe deficiency (Kobayashi et al. 2005). The Fe(III)-PS complexes are then absorbed by yellow stripe (YS) or yellow stripe-like (YSL) transmembrane proteins (Song et al. 2024). Alongside these essential proteins, the PDR9 transporter assists in the production of coumarins, supporting Fe uptake, especially in alkaline environments (Tsai & Schmidt, 2017). It has been shown that all genes activated by Fe deficiency, which are involved in Fe absorption, contain a higher frequency of iron-deficiency-responsive cis-acting elements IDE1 and IDE2 homologous sequences in their promoter regions (Kobayashi et al. 2010). Rice, a graminaceous species, employs a dual strategy for Fe acquisition, absorbing Fe³⁺ via DMA-mediated chelation (Strategy II) and directly importing Fe²⁺ via the transporters OsIRT1 and OsIRT2 (Ishimaru et al. 2006; Li et al. 2019).

Upon entering the root symplast, Fe is bound to several chelators to keep it soluble and prevent its participation in the formation of harmful hydroxyl radicals (Kim & Guerinot, 2007). Fe

movements symplastically through the connected cytoplasm of root tissue via a diffusion gradient before being transported into the xylem vessels (Kobayashi & Nishizawa, 2012). The MATE family transporter FRD3 enables citrate efflux into the xylem, supporting Fe–citrate complex formation and allowing long-distance Fe transport from roots to shoots (Roschztardt et al. 2011). Fe is mainly transferred in the xylem as Fe(III)–citrate complexes, which move to the shoots via the transpiration stream (Morrissey & Guerinot, 2009). For developing organs with low transpiration rates, such as seeds and shoot apices, Fe must be redistributed through the phloem to ensure sufficient supply to sink tissues (Briat et al. 2015).

Nicotianamine (NA), with a molecular weight of 303, is a crucial metabolite found in most higher plants (Curie et al. 2009). NA is produced by NA synthase (NAS) from three molecules of S-adenosylmethionine (SAM) and serves as a key precursor in the biosynthesis of MAs (Liu et al. 2026). After root cells take up Fe(II)-MA, Fe(III)-MA, and Zn(II)-MA complexes, the metal ions are released and subsequently chelated by NA, forming Fe(II)-NA, Fe(III)-NA, and Zn(II)-NA complexes (Seregin & Kozhevnikova, 2023). Functionally, NA acts as an essential chelator in the phloem, forming stable complexes with Fe at neutral or mild alkaline pH conditions (Hell & Stephan, 2003). When roots are deprived of Fe, the genes *NAS2* and *NAS4* are activated, suggesting that NA plays a part in the movement of iron from roots to shoots (Klatte et al. 2009). Fe-NA complex overloading into the phloem is largely dependent on YSL transporters, particularly those in the YSL gene family (Morrissey & Guerinot, 2009). In some species, including the castor bean, an 11 kDa dehydrin referred to as iron transport protein (ITP) selectively binds Fe(III) in the phloem (Kim & Guerinot, 2007). The redirection of Fe from older leaves to actively growing sinks is a highly controlled process that relies on these specialized chelators and transporters (Hell & Stephan, 2003).

2.2. Subcellular Iron Homeostasis and Compartmentalization

Cellular Fe dynamics are carefully regulated to ensure adequate supply for essential metabolic processes such as photosynthesis and respiration while preventing excessive accumulation that may cause cellular toxicity (Gayomba et al. 2015; Berger et al. 2023). Up to 80% of the Fe in leaf cells is usually located in chloroplasts, making these organelles the primary Fe sinks in plants (Martín-Barranco et al. 2021). The ferric chelate reductase 7 (FRO7) and the transporter permease chloroplast 1 (PIC1), which are found in the inner envelope membrane, are necessary for the import of Fe into the chloroplast (Jeong & Connolly, 2009). In the plastid stroma, Fe is stored by ferritin, an Fe-storage protein that can sequester up to 4,500 Fe atoms (Briat et al. 2006). The plant vacuole acts as an essential storage site, sequestering excess Fe to prevent cytosolic toxicity (Ram et al. 2021). The vacuolar iron transporter 1 (VIT1) enables Fe loading into the seed vacuole, which is needed for correct Fe distribution in the embryo (Kim et al. 2006; Briat et al. 2015). Through germination, the release of Fe from vacuolar stores is controlled by the natural resistance-associated macrophage proteins NRAMP3 and NRAMP4 (Lanquar et al. 2005). Plant mitochondria require Fe for essential metabolic processes such as heme production, mitochondrial respiration, and the association of iron–sulfur (Fe–S) clusters (Vigani & Hanikenne, 2017; Przybyla-Toscano et al. 2021). Transporters such as mitochondrial

iron transporter (MIT) play a key function in delivering Fe to mitochondria and are important for normal growth and development (Kobayashi & Nishizawa, 2012). Because free Fe is greatly reactive and potentially harmful, it must remain tightly bound to specific proteins that regulate its availability and maintain intracellular Fe homeostasis (Morrissey & Guerinot, 2009). Collectively, this coordinated system of organellar sequestration, transport, and remobilization allows plants to maintain cellular Fe balance in response to environmental fluctuations (Liang, 2022).

3. BREEDING STRATEGIES FOR IRON BIOFORTIFICATION

One sustainable way to fight hidden hunger is through biofortification, which seeks to enhance staple crops with nutrients (Sharma et al. 2017). Biofortification is a strategy aimed at raising mineral and vitamin levels in the edible parts of plants during growth, and it can be achieved through various approaches, such as traditional plant breeding, agronomic applies, and genetic engineering (Bhatnagar et al. 2011).

3.1. Conventional Breeding

Among biofortification methods, conventional breeding is strategically important because it has higher consumer acceptance, fewer legal barriers, and no extra operating costs compared to genetic engineering (Singh et al. 2016; Shahzad et al. 2021; Azeem et al. 2025). The conventional breeding method involves screening natural genetic diversity in existing germplasm or wild relatives to identify genotypes with high Fe content. Then, these lines are crossed with high-yielding varieties, and the desired nutritional content is combined with agronomic traits through several generations of selection (Tessema et al. 2026). For example, *Triticum dicoccoides* and *Aegilops tauschii*, two wild relatives of cultivated wheat, have been identified as rich sources of genetic diversity and have been effectively employed in breeding programs to increase grain Fe levels in contemporary wheat varieties (Cakmak et al. 2004; Rawat et al. 2009). The rice variety IR68144, a hybrid of IR8 and Taichung (Native)-1, has been detected as a high-Fe genotype and is widely used in rice biofortification programs (Gregorio, 2000; Gregorio, 2002). During this process, investigating genotype x environment (G×E) interactions to ensure the stability of Fe accumulation under diverse environmental conditions and to guarantee that no yield loss occurs are critical steps (Xu et al. 2024).

Indeed, in recent years, thanks to conventional breeding efforts by HarvestPlus and similar international programs, many biofortified varieties of Fe-rich staple crops have been obtained and introduced into production in numerous countries (Sharma et al. 2017; Maqbool et al. 2020; Senguttuvel & Govindaraj, 2023; Singh et al. 2025). Fe-enriched dry bean varieties (e.g., HM 21-7, RWR 2154) that are becoming widespread in Rwanda and the Democratic Republic of Congo, along with high-Fe pearl millet varieties (e.g., Dhanashakti) developed in India, represent the most concrete examples of the success of traditional breeding in combating hidden hunger (Govindaraj et al. 2019; Antoine et al. 2020; Luna et al. 2020). However, conventional plant breeding alone may not always be sufficient due to challenges such as long development

times, linkage drag risk, and limited genetic variation; this underscores the need for other methods in biofortification research (Singer et al. 2021; Gudi et al. 2022).

3.2. Agronomic Biofortification

Agronomic biofortification includes the treatment of mineral fertilizers to soil or foliage to enhance the micronutrient content in the consumable portions of plants (Bhardwaj et al. 2022). This strategy, designed specifically to promote micronutrient security within food security policies, is an effective tool for combating malnutrition in regions where plant-based diets predominate (Jan et al. 2020). This process, which involves transferring micronutrients from plants to food and ultimately to the human body, can vary with environmental and genetic factors, including organic matter content, soil pH, and plant genotype (Sharma et al. 2020). Agronomic biofortification methods are typically classified into two types: soil and foliar applications. In soil applications, micronutrients are applied directly to the soil before or during planting; but, in high-pH or calcareous soils, mineral availability to plants may be limited by mineral fixation (De Valença et al. 2017). In foliar applications, fertilizer solutions are sprayed directly onto plant leaves, enabling quick nutrient absorption into plant tissues. This method is regarded as effective, especially for increasing mineral content in cereal grains (Cakmak, 2008). Ramzan et al. (2020) show that the Fe content of wheat grains, which was 43.33 mg kg⁻¹ in the control group, increased to 78.33 mg kg⁻¹ with the foliar application of 1% FeSO₄. Foliar application of Fe fertilizers considerably raises cereal Fe concentration in wheat, rising from 29.5 mg kg⁻¹ in the control group to 37.8 mg kg⁻¹ after FeSO₄ application (Zhang et al. 2010). A global meta-analysis revealed that Fe fertilization increased Fe concentrations in wheat grain by about 20.5% compared with unfertilized controls (Zhou et al. 2024). Meta-analyses demonstrate that micronutrient fertilization can enhance Fe and Zn contents in maize grains by up to 31% compared with conventional fertilization trainings (Kihara et al. 2024).

3.3. Genetic and Molecular Approaches

3.3.1. Marker-Assisted Selection (MAS)

Understanding the transport mechanisms and genetic capacity of Fe in plants is necessary for the success of biofortification efforts and ensuring sustainability in plant production. Marker-assisted selection (MAS) is a modern breeding method that allows the identification of chosen genes or traits at early developmental stages using molecular markers (Gao & Li, 2025). This approach quickly and reliably detects target genes using DNA markers linked to a specific phenotypic trait (Singh & Singh, 2015). Hence, selection can occur at the genetic level before plants display a phenotype (Collard & Mackill, 2008). One of the main benefits of the MAS method is that genetic selection can be carried out without environmental factors influencing it (Boopathi, 2020). MAS is especially effective for traits controlled by major genes or a small number of quantitative trait loci (QTLs) (Xu & Crouch, 2008). This approach has been used to develop plant varieties with elevated micronutrient levels for Fe fortification. Successfully identifying gene-specific SSR markers that boost Fe (VTL) and zinc (Zn) (NAM-B1)

accumulation in wheat while restricting cadmium (Cd) levels, this establishes a strategic scientific foundation for developing nutrient-rich and safe genotypes through MAS (Rasheed et al. 2023). Basnet & Khanal (2022) identified numerous QTLs and SNPs associated with gene families such as YS, NRAMP, and ferritin in their study on Fe and Zn bioaccumulation in maize, demonstrating that these genetic loci have significant potential to increase microelement accumulation in endosperm through MAS. QTL analyses conducted on the IR64 × Azucena rice population have shown that phytate content is controlled by genetic loci distinct from those controlling Fe and Zn accumulation, which could enable the development of varieties with low phytate but high Fe and Zn concentration using MAS (Stangoulis et al. 2007).

3.3.2. Transgenic Approaches

Transgenic approaches are modern engineering methods used to improve genotypes by directly transferring specific genes into targeted genotypes to alter metabolic pathways (Saini et al. 2022). These methods provide a crucial alternative when there is restricted natural genetic variation in a species' gene pool for traditional breeding, or when the crop is unsuitable for such methods (Kumar et al. 2019). Numerous significant agronomic genes have been extracted from diverse species, cloned, and utilized to create appropriate constructs for plant transformation (Low et al. 2018; Munaweera et al. 2022). Techniques such as Agrobacterium-mediated transformation and particle gun (biolistic) gene delivery have been optimized and are now used to genetically modify multiple plant species (Gosal & Wani, 2018). Transgenic strategies for Fe biofortification aim to enhance Fe uptake by roots, improve its long-distance transport inside the plant, and increase its storage in edible tissues such as seed endosperm (Masuda et al. 2013; Basu, 2016; Kumar et al. 2019). Ferritin genes, especially those from soybeans, have been successfully expressed in staple grains like rice and wheat under endosperm-specific promoters to boost Fe storage area capacity (Borg et al. 2006; Khalekuzzaman et al. 2006). Boonyaves et al. (2016) showed that co-expressing the Arabidopsis-derived *AtIRT1* gene with ferritin and *NAS* genes in rice significantly increased grain Fe levels, reaching approximately $9.6 \mu\text{g g}^{-1}$ in dry weight. Tsakirpaloglou et al. (2023) demonstrated that rice lines co-expressing dicot-derived ferritin genes with *OsNAS2* had Fe content in polished grains increased to around $13 \mu\text{g g}^{-1}$ and Zn to $50 \mu\text{g g}^{-1}$, indicating potential to meet biofortification goals. Gupta et al. (2023) demonstrated that transgenic rice lines expressing ferritin genes from *Phaseolus vulgaris* and *Pennisetum glaucum* in the endosperm, along with *OsNAS2*, increased grain Fe and Zn content by about 4.2 and 3.5 times, respectively. In wheat, endosperm-specific expression of the *TaVIT2* gene significantly increased Fe in the flour fraction (Connorton et al. 2017). Abid et al. (2017) demonstrated that wheat endosperm expressing the phytase gene (*phyA*) from *Aspergillus japonicus* greatly improved Fe and Zn bioavailability by lowering phytate levels. Ishimaru et al. (2010) found that overexpressing the *OsYSL2* gene in rice's phloem and developing seeds regulates Fe transport inside the plant, and that its overexpression under proper promoters can boost Fe concentration in polished rice grains by 4.4 times.

3.3.3. Genome Editing Approaches

The CRISPR/Cas9 approach is an adaptive immune strategy used by bacteria against foreign genetic elements, and it is a powerful tool that creates double-strand breaks in targeted genomic regions via an RNA-guided nuclease complex (Hryhorowicz et al. 2017; Demirci et al. 2018; Janik et al. 2020). DNA breaks created by the CRISPR/Cas9 system are repaired by endogenous cellular pathways, such as homologous recombination (HDR) or non-homologous end-joining (NHEJ) (Yang et al. 2020). This can follow in targeted gene deletions, insertions, or sequence changes, enabling the creation of specific mutations at genomic locations (Liao et al. 2024). This technology stands out for being much more economical, faster, more precise, and suitable for multiple-gene editing than traditional breeding methods or genome editing systems such as zinc finger nucleases (ZFNs) and transcription activator-like effector nucleases (TALENs) (Bortesi & Fischer, 2015; Jaganathan et al. 2018). One of the key advantages of genome editing technologies is the capability to generate “transgene-free” plants without inserting foreign DNA; this enables these plants to be evaluated similarly to traditional breeding products in many countries and helps with regulatory approval (He & Zhao, 2020; Mushtaq et al. 2021). This approach of targeting and regulating genes involved in Fe uptake, transport, and storage enhances the Fe content in cereals (Khan et al. 2024). Ibrahim et al. (2022) used the CRISPR/Cas9 system to target the *TaIPK1* gene in wheat and demonstrated that this reduced grain phytic acid content, thereby increasing Fe and Zn accumulation and bioavailability. Nguyen et al. (2025) augmented Fe accumulation in rice by CRISPR/Cas9-mediated modification of the Fe transporter gene *OsNRAMP7*, achieving an 18–72% increase in grain Fe content while preserving essential agronomic features. The *TaHRZ1* and *TaHRZ2* genes, which regulate Fe homeostasis in wheat, were identified, and editing the *TaHRZ1* gene with CRISPR-Cas9 increased grain Fe accumulation, particularly in the embryo (scutellum) region, in the modified lines. CRISPR/Cas9-generated *osvit1/osvit2* double mutants increased Fe accumulation in rice grains and demonstrated that *OsVIT* transporters are key genes regulating the internal distribution of Fe inside the plant (Benato et al. 2025).

4. CONCLUSION

Iron deficiency remains one of the most important micronutrient deficits impacting human health, especially in areas where grain-based diets are prevalent. Therefore, raising the Fe content and bioavailability of staple foods has become a key priority in ensuring global food safety. Recent advancements in plant molecular biology and genetics have enhanced our comprehension of the systems governing iron uptake, transport, storage, and grain loading in plants. These reports have contributed to the identification of key components, including carrier proteins, chelator molecules, and transcriptional regulators, that regulate Fe homeostasis. Various breeding strategies have been developed for Fe biofortification. While traditional breeding methods leverage natural genetic variation, agronomic biofortification can boost mineral accumulation quickly through fertilization practices. Additionally, marker-assisted selection enables quick identification of genes linked to micronutrient accumulation. Transgenic approaches and genome-editing technologies, such as CRISPR/Cas systems, offer powerful tools for next-generation biofortification. Future research is likely to focus on developing high-yielding, nutritionally enhanced cereal varieties by integrating multi-omics

approaches, functional genomics analyses, and precise breeding techniques. These comprehensive strategies will be essential in fighting hidden hunger and creating sustainable food systems.

REFERENCE

- Abera, S., Yohannes, W., & Chandravanshi, B. S. (2023). Effect of processing methods on antinutritional factors (oxalate, phytate, and tannin) and their interaction with minerals (calcium, iron, and zinc) in red, white, and black kidney beans. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2023(1), 6762027.
- Abid, N., Khatoon, A., Maqbool, A., Irfan, M., Bashir, A., Asif, I., ... & Malik, K. A. (2017). Transgenic expression of phytase in wheat endosperm increases bioavailability of iron and zinc in grains. *Transgenic research*, 26(1), 109-122.
- Alaba Samson Kunlere. Strategies to address food insecurity and improve global nutrition among at-risk populations. *International Journal of Science and Research Archive*, 2025, 14(02), 1657-1680. Article DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.2.0564>.
- Antoine, K. L., Roger, K. V., Emery, K. L., Adrien, K. M., & Chirwa, R. M. (2020). Biofortified bean genotypes under integrated soil fertility management across sub-humid agro-ecological zones of The Democratic Republic of Congo. *African Journal of Agricultural Research*, 16(10), 1384-1400.
- Azeem, A., Khan, S., Zia Ul Haq, M., Shafiq, S., Aslam, M. T., Munir, S., & Sikandar Zaman, M. (2025). Biofortification strategies for enhancing crop nutritional value: a review of methods, challenges, and future directions. *Discover Plants*, 2(1), 185.
- Bahgat, K. A. E., Nasr, H. M., & El-Sayed, S. K. (2022). Effect of iron deficiency on behavior and cognition in children. *International Journal of Health Sciences*, 6(S7), 998-1011.
- Basnet, B., & Khanal, S. (2022). Quantitative trait loci and candidate genes for iron and zinc bio-fortification in genetically diverse germplasm of maize (*Zea mays* L): A systematic review. *Heliyon*, 8(12).
- Basu, P. S. (2016). Physiological Processes Toward Movement of Micronutrients from Soil to Seeds in Biofortification Perspectives. *Biofortification of Food Crops*, 317-329.
- Berger, N., Marin, A. J., Stassen, M. J., Lourenço, T., Li, M., Watanabe, S., ... & Dubos, C. (2023). Molecular regulation of iron homeostasis in plants. In *Progress in Botany Vol. 85* (pp. 75-103). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Bhardwaj, A. K., Chejara, S., Malik, K., Kumar, R., Kumar, A., & Yadav, R. K. (2022). Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1055278.
- Bhatnagar, M., Bhatnagar-Mathur, P., Reddy, D. S., Anjaiah, V., & Sharma, K. K. (2011). Crop biofortification through genetic engineering: present status and future directions.
- Blank, P. R., Tomonaga, Y., Szucs, T. D., & Schwenkglens, M. (2019). Economic burden of symptomatic iron deficiency—a survey among Swiss women. *BMC women's health*, 19(1), 39.
- Boonyaves, K., Gruissem, W., & Bhullar, N. K. (2016). NOD promoter-controlled AtIRT1 expression functions synergistically with NAS and FERRITIN genes to increase iron in rice grains. *Plant Molecular Biology*, 90(3), 207-215.

- Boopathi, N. M. (2020). Marker-assisted selection (MAS). In *Genetic mapping and marker assisted selection: Basics, practice and benefits* (pp. 343-388). Singapore: Springer Singapore.
- Borg, S., Agius, S., Kristiansen, K., & Holm, P. B. (2006). Wheat Ferritin: Fortification of wheat endosperm with bioavailable iron.
- Bortesi, L., & Fischer, R. (2015). The CRISPR/Cas9 system for plant genome editing and beyond. *Biotechnology advances*, 33(1), 41-52.
- Briat, J. F., Cellier, F., & Gaymard, F. (2006). Ferritins and iron accumulation in plant tissues. In *Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms* (pp. 341-357). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in plant science*, 20(1), 33-40.
- Burchi, F., Fanzo, J., & Frison, E. (2011). The role of food and nutrition system approaches in tackling hidden hunger. *International journal of environmental research and public health*, 8(2), 358-373.
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?. *Plant and soil*, 302(1), 1-17.
- Cakmak, İ., Torun, A. Y. F. E. R., Millet, E., Feldman, M., Fahima, T., Korol, A., ... & Özkan, H. (2004). Triticum dicoccoides: an important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat. *Soil science and plant nutrition*, 50(7), 1047-1054.
- Collard, B. C., & Mackill, D. J. (2008). Marker-assisted selection: an approach for precision plant breeding in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 557-572.
- Connorton, J. M., Jones, E. R., Rodríguez-Ramiro, I., Fairweather-Tait, S., Uauy, C., & Balk, J. (2017). Wheat vacuolar iron transporter TaVIT2 transports Fe and Mn and is effective for biofortification. *Plant physiology*, 174(4), 2434-2444.
- Curie, C., Cassin, G., Couch, D., Divol, F., Higuchi, K., Le Jean, M., ... & Mari, S. (2009). Metal movement within the plant: contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters. *Annals of botany*, 103(1), 1-11.
- De Valença, A. W., Bake, A., Brouwer, I. D., & Giller, K. E. (2017). Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global food security*, 12, 8-14.
- Demirci, Y., Zhang, B., & Unver, T. (2018). CRISPR/Cas9: an RNA-guided highly precise synthetic tool for plant genome editing. *Journal of cellular physiology*, 233(3), 1844-1859.
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Kaur, J., Verma, V., Singh, P., ... & Hossain, A. (2021). Enrichment of zinc and iron micronutrients in lentil (*Lens culinaris* Medik.) through biofortification. *Molecules*, 26(24), 7671.
- Ebadi, A. G., & Selamoglu, Z. (2025). Climate Change, Food Security, and Human Health: A Comprehensive Analysis of Global Problems and Sustainable Nutritional Plans. *Wah Academia Journal of Health and Nutrition*, 1(3), 39-46.
- FAO. (2023). *The state of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/measuring-hunger/en.02.03.2026>

- Gao, H., & Li, H. (2025). Marker-assisted selection (MAS) in soybean breeding. *Molecular Plant Breeding*, 16.
- Gayomba, S. R., Zhai, Z., Jung, H. I., & Vatamaniuk, O. K. (2015). Local and systemic signaling of iron status and its interactions with homeostasis of other essential elements. *Frontiers in Plant Science*, 6, 716.
- Gosal, S. S., & Wani, S. H. (2018). Plant genetic transformation and transgenic crops: methods and applications. In *Biotechnologies of Crop Improvement, Volume 2: Transgenic Approaches* (pp. 1-23). Cham: Springer International Publishing.
- Govindaraj, M., Rai, K. N., Cherian, B., Pfeiffer, W. H., Kanatti, A., & Shivade, H. (2019). Breeding biofortified pearl millet varieties and hybrids to enhance millet markets for human nutrition. *Agriculture*, 9(5), 106.
- Gregorio, G. B. (2002). Progress in breeding for trace minerals in staple crops. *The Journal of nutrition*, 132(3), 500S-502S.
- Gregorio, G. B., Senadhira, D., Htut, H., & Graham, R. D. (2000). Breeding for trace mineral density in rice. *Food and Nutrition Bulletin*, 21(4), 382-386.
- Gudi, S., Kumar, P., Singh, S., Tanin, M. J., & Sharma, A. (2022). Strategies for accelerating genetic gains in crop plants: special focus on speed breeding. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(10), 1921-1938.
- He, Y., & Zhao, Y. (2020). Technological breakthroughs in generating transgene-free and genetically stable CRISPR-edited plants: Technological breakthroughs in generating transgene-free and genetically.... *Abiotech*, 1(1), 88-96.
- Hell, R., & Stephan, U. W. (2003). Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. *Planta*, 216(4), 541-551.
- Hryhorowicz, M., Lipiński, D., Zeyland, J., & Słomski, R. (2017). CRISPR/Cas9 immune system as a tool for genome engineering. *Archivum immunologiae et therapiae experimentalis*, 65(3), 233-240.
- Hunt, J. M. (2002). Reversing productivity losses from iron deficiency: the economic case. *The Journal of nutrition*, 132(4), 794S-801S.
- Ibrahim, S., Saleem, B., Rehman, N., Zafar, S. A., Naeem, M. K., & Khan, M. R. (2022). CRISPR/Cas9 mediated disruption of Inositol Pentakisphosphate 2-Kinase 1 (TaIPK1) reduces phytic acid and improves iron and zinc accumulation in wheat grains. *Journal of Advanced Research*, 37, 33-41.
- Ishimaru, Y., Masuda, H., Bashir, K., Inoue, H., Tsukamoto, T., Takahashi, M., ... & Nishizawa, N. K. (2010). Rice metal-nicotianamine transporter, OsYSL2, is required for the long-distance transport of iron and manganese. *The Plant Journal*, 62(3), 379-390.
- Ishimaru, Y., Suzuki, M., Tsukamoto, T., Suzuki, K., Nakazono, M., Kobayashi, T., ... & Nishizawa, N. K. (2006). Rice plants take up iron as an Fe³⁺-phytosiderophore and as Fe²⁺. *The Plant Journal*, 45(3), 335-346.
- Jaganathan, D., Ramasamy, K., Sellamuthu, G., Jayabalan, S., & Venkataraman, G. (2018). CRISPR for crop improvement: an update review. *Frontiers in plant science*, 9, 985.
- Jahan, T. A., & Tar'an, B. (2023). Agronomic approach to iron biofortification in chickpea. *Agronomy*, 13(12), 2894.

- Jan, B., Bhat, T. A., Sheikh, T. A., Wani, O. A., Bhat, M. A., Nazir, A., ... & Rashid, A. (2020). Agronomic bio-fortification of rice and maize with iron and zinc: A review. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 21(16), 28-37.
- Janik, E., Niemcewicz, M., Ceremuga, M., Krzowski, L., Saluk-Bijak, J., & Bijak, M. (2020). Various aspects of a gene editing system—crispr-cas9. *International journal of molecular sciences*, 21(24), 9604.
- Jeong, J., & Connolly, E. L. (2009). Iron uptake mechanisms in plants: functions of the FRO family of ferric reductases. *Plant science*, 176(6), 709-714.
- Khalekuzzaman, M., Datta, K., Oliva, N., Alam, M. F., Joarder, O. I., & Datta, S. K. (2006). Stable integration, expression and inheritance of the ferritin gene in transgenic elite indica rice cultivar BR29 with enhanced iron level in the endosperm. *Indian Journal of Biotechnology*, 5(1), 26-31.
- Khan, A., Pudhuvai, B., Shrestha, A., Mishra, A. K., Shah, M. P., Koul, B., & Dey, N. (2024). CRISPR-mediated iron and folate biofortification in crops: Advances and perspectives. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 40(4), 4138-4168.
- Kihara, J., Sileshi, G. W., Bolo, P., Mutambu, D., Senthilkumar, K., Sila, A., ... & Saito, K. (2024). Maize-grain zinc and iron concentrations as influenced by agronomic management and biophysical factors: a meta-analysis. *Food Security*, 16(5), 1147-1173.
- Kim, S. A., & Guerinot, M. L. (2007). Mining iron: iron uptake and transport in plants. *FEBS letters*, 581(12), 2273-2280.
- Kim, S. A., Punshon, T., Lanzirotti, A., Li, L., Alonso, J. M., Ecker, J. R., ... & Guerinot, M. L. (2006). Localization of iron in Arabidopsis seed requires the vacuolar membrane transporter VIT1. *Science*, 314(5803), 1295-1298.
- Klatte, M., Schuler, M., Wirtz, M., Fink-Straube, C., Hell, R., & Bauer, P. (2009). The analysis of Arabidopsis nicotianamine synthase mutants reveals functions for nicotianamine in seed iron loading and iron deficiency responses. *Plant physiology*, 150(1), 257-271.
- Kobayashi, T., & Nishizawa, N. K. (2012). Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. *Annual review of plant biology*, 63, 131-152.
- Kobayashi, T., Nakanishi, H., & Nishizawa, N. K. (2010). Dual regulation of iron deficiency response mediated by the transcription factor IDEF1. *Plant Signaling & Behavior*, 5(2), 157-159.
- Kobayashi, T., Suzuki, M., Inoue, H., Itai, R. N., Takahashi, M., Nakanishi, H., ... & Nishizawa, N. K. (2005). Expression of iron-acquisition-related genes in iron-deficient rice is co-ordinately induced by partially conserved iron-deficiency-responsive elements. *Journal of Experimental Botany*, 56(415), 1305-1316.
- Korczak, A., Wójcik, E., Olek, E., Łopacińska, O., Stańczyk, K., Korn, A., ... & Czarnecka, K. (2024). The Long-Term effects of Iron Deficiency in Early Infancy on Neurodevelopment. *Journal of Education, Health and Sport*, 70, 51104-51104.
- Kumar, S., Palve, A., Joshi, C., & Srivastava, R. K. (2019). Crop biofortification for iron (Fe), zinc (Zn) and vitamin A with transgenic approaches. *Heliyon*, 5(6).
- Lanquar, V., Lelièvre, F., Bolte, S., Hamès, C., Alcon, C., Neumann, D., ... & Thomine, S. (2005). Mobilization of vacuolar iron by AtNRAMP3 and AtNRAMP4 is essential for seed germination on low iron. *The EMBO journal*, 24(23), 4041.

- Leung, A. K., Lam, J. M., Wong, A. H., Hon, K. L., & Li, X. (2024). Iron deficiency anemia: an updated review. *Current pediatric reviews*, 20(3), 339-356.
- Li, Q., Chen, L., & Yang, A. (2019). The molecular mechanisms underlying iron deficiency responses in rice. *International journal of molecular sciences*, 21(1), 43.
- Liang, G. (2022). Iron uptake, signaling, and sensing in plants. *Plant Communications*, 3(5).
- Liao, H., Wu, J., VanDusen, N. J., Li, Y., & Zheng, Y. (2024). CRISPR-Cas9-mediated homology-directed repair for precise gene editing. *Molecular Therapy Nucleic Acids*, 35(4).
- Liu, G., Sun, Y., He, P., Wang, Y., Zhang, Y., Li, Q., ... & Wang, Z. (2026). Identification of the Nicotianamine synthase (NAS) gene family in wheat (*Triticum aestivum* L.) and the role of its member TaNAS4-A in Zn and Fe transport. *Functional & Integrative Genomics*, 26(1), 11.
- Lopez, A., Cacoub, P., Macdougall, I. C., & Peyrin-Biroulet, L. (2016). Iron deficiency anaemia. *The Lancet*, 387(10021), 907-916.
- Low, L. Y., Yang, S. K., Kok, D. X. A., Ong-Abdullah, J., Tan, N. P., & Lai, K. S. (2018). Transgenic plants: gene constructs, vector and transformation method. In *New visions in plant science*. intechopen.
- Luna, S. V., Pompano, L. M., Lung'aho, M., Gahutu, J. B., & Haas, J. D. (2020). Increased iron status during a feeding trial of iron-biofortified beans increases physical work efficiency in Rwandan women. *The Journal of Nutrition*, 150(5), 1093-1099.
- Maqbool, A., Abrar, M., Bakhsh, A., Çalışkan, S., Khan, H. Z., Aslam, M., & Aksoy, E. (2020). Biofortification under climate change: the fight between quality and quantity. In *Environment, climate, plant and vegetation growth* (pp. 173-227). Cham: Springer International Publishing.
- Martín-Barranco, A., Thomine, S., Vert, G., & Zelazny, E. (2021). A quick journey into the diversity of iron uptake strategies in photosynthetic organisms. *Plant Signaling & Behavior*, 16(11), 1975088.
- Masuda, H., Aung, M. S., & Nishizawa, N. K. (2013). Iron biofortification of rice using different transgenic approaches. *Rice*, 6(1), 40.
- Masuda, H., Kobayashi, T., Ishimaru, Y., Takahashi, M., Aung, M. S., Nakanishi, H., ... & Nishizawa, N. K. (2013). Iron-biofortification in rice by the introduction of three barley genes participated in mugineic acid biosynthesis with soybean ferritin gene. *Frontiers in plant science*, 4, 132.
- Mbuya, N. V., Atwood, S. J., & Huynh, P. N. (2019). *Persistent malnutrition in ethnic minority communities of Vietnam: Issues and options for policy and interventions*. World Bank Publications.
- Morrissey, J., & Guerinot, M. L. (2009). Iron uptake and transport in plants: the good, the bad, and the ionome. *Chemical reviews*, 109(10), 4553-4567.
- Munaweera, T. I. K., Jayawardana, N. U., Rajaratnam, R., & Dissanayake, N. (2022). Modern plant biotechnology as a strategy in addressing climate change and attaining food security. *Agriculture & Food Security*, 11(1), 26.

- Mushtaq, M., Ahmad Dar, A., Skalicky, M., Tyagi, A., Bhagat, N., Basu, U., ... & El Sabagh, A. (2021). CRISPR-based genome editing tools: Insights into technological breakthroughs and future challenges. *Genes*, 12(6), 797.
- Naveed, M., Khalid, H., Ayub, M. A., Rehman, M. Z. U., Rizwan, M., Rasul, A., & Haq, M. A. U. (2020). Biofortification of cereals with zinc and iron: recent advances and future perspectives. *Resources use efficiency in agriculture*, 615-646.
- Nguyen, P. D. (2025). CRISPR-enhanced iron accumulation in TBR225 rice via OsNRAMP7 overexpression. *Journal of Plant Biotechnology*, 52(1), 51-59.
- Obeagu, E. I. (2025). The Impact of Anemia on the Immune System during Pregnancy: A Review. *International Journal of Medical Sciences and Pharma Research*, 11(1), 28-33.
- Paul, M., Thriveni, V., Niharika, M., Upadhyay, D. K., Kiro, D., Verma, A., & Patil, S. (2024). A review on biofortification of crops: A nutritional strategy for combating malnutrition. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 16(11), 63-77.
- Pereira, M. P., Santos, C., Gomes, A., & Vasconcelos, M. W. (2014). Cultivar variability of iron uptake mechanisms in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant physiology and biochemistry*, 85, 21-30.
- Przybyla-Toscano, J., Christ, L., Keech, O., & Rouhier, N. (2021). Iron–sulfur proteins in plant mitochondria: roles and maturation. *Journal of Experimental Botany*, 72(6), 2014-2044.
- Ram, H., Sardar, S., & Gandass, N. (2021). Vacuolar iron transporter (like) proteins: Regulators of cellular iron accumulation in plants. *Physiologia Plantarum*, 171(4), 823-832.
- Ram, S., Narwal, S., Gupta, O. P., Pandey, V., & Singh, G. P. (2020). Anti-nutritional factors and bioavailability: Approaches, challenges, and opportunities. *Wheat and barley grain biofortification*, 101-128.
- Ramzani, P. M. A., Khalid, M., Naveed, M., Irum, A., Khan, W. U. D., & Kausar, S. (2016). Iron biofortification of cereals grown under calcareous soils: problems and solutions. In *Soil science: Agricultural and environmental perspectives* (pp. 231-258). Cham: Springer International Publishing.
- Rasheed, A., Ahmad, J., Nadeem, M., Rashid, M. A. R., & Azeem, F. (2023). Microsatellite markers-aided dissection of iron, zinc and cadmium accumulation potential in *Triticum aestivum*. *PeerJ*, 11, e15229.
- Rawat, N., Neelam, K., Tiwari, V. K., & Dhaliwal, H. S. (2013). Biofortification of cereals to overcome hidden hunger. *Plant Breeding*, 132(5), 437-445.
- Rawat, N., Tiwari, V. K., Singh, N., Randhawa, G. S., Singh, K., Chhuneja, P., & Dhaliwal, H. S. (2009). Evaluation and utilization of *Aegilops* and wild *Triticum* species for enhancing iron and zinc content in wheat. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56(1), 53-64.
- Roschztardt, H., Séguéla-Arnaud, M., Briat, J. F., Vert, G., & Curie, C. (2011). The FRD3 citrate effluxer promotes iron nutrition between symplastically disconnected tissues throughout Arabidopsis development. *The Plant Cell*, 23(7), 2725-2737.
- Rout, G. R., & Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in agricultural science*, 3, 1-24.

- Saini, P. K., Bhati, J., Kumar, K., Goyal, G., Tripathi, S. K., Shukla, S., ... & Prasad, S. (2022). Biofortification of iron, zinc, and iodine in crops using transgenic techniques. *Opsearch: American Journal of Open Research*, 1(2), 48-61.
- Sathyaseelan, C., Nallusamy, S., Kannusamy, G., Chidambaram, L., Remadevi, R., & Shanmugam, V. (2025). Evolutionary and functional insights into FRO2 genes in *Oryza sativa*: comparative in silico analysis of iron uptake mechanisms across plant species. *Discover Plants*, 2(1), 37.
- Senguttuvel, P., G, P., C, J., CN, N., V, J., P, B., ... & Govindaraj, M. (2023). Rice biofortification: breeding and genomic approaches for genetic enhancement of grain zinc and iron contents. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1138408.
- Seregin, I. V., & Kozhevnikova, A. D. (2023). Nicotianamine: a key player in metal homeostasis and hyperaccumulation in plants. *International journal of molecular sciences*, 24(13), 10822.
- Shahzad, R., Jamil, S., Ahmad, S., Nisar, A., Khan, S., Amina, Z., ... & Zhou, W. (2021). Biofortification of cereals and pulses using new breeding techniques: current and future perspectives. *Frontiers in nutrition*, 8, 721728.
- Sharma, D., Ghimire, P., Bhattarai, S., Adhikari, U., Khanal, S., & Poudel, P. B. (2020). Biofortification of wheat: Genetic and agronomic approaches and strategies to combat Iron and Zinc deficiency. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 5(4).
- Sharma, P., Aggarwal, P., & Kaur, A. (2017). Biofortification: A new approach to eradicate hidden hunger. *Food Reviews International*, 33(1), 1-21.
- Shukla, A. K., Behera, S. K., Pakhre, A., & Chaudhari, S. K. (2018). Micronutrients in soils, plants, animals and humans. *Indian Journal of Fertilisers*, 14(3), 30-54.
- Singer, S. D., Laurie, J. D., Bilichak, A., Kumar, S., & Singh, J. (2021). Genetic variation and unintended risk in the context of old and new breeding techniques. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 40(1), 68-108.
- Singh, A., Kaul, S., Dikshit, H. K., & Kumar, S. (2025). From Deficiency to Sufficiency: Tackling Hidden Hunger with Biofortified Staples. In *Plant Breeding 2050: Next-Gen Crops* (pp. 79-101). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Singh, B. D., & Singh, A. K. (2015). Marker-assisted selection. In *Marker-assisted plant breeding: principles and practices* (pp. 259-293). New Delhi: Springer India.
- Singh, U., Praharaj, C. S., Chaturvedi, S. K., & Bohra, A. (2016). Biofortification: Introduction, approaches, limitations, and challenges. In *Biofortification of food crops* (pp. 3-18). New Delhi: Springer India.
- Solberg, A., & Reikvam, H. (2023). Iron status and physical performance in athletes. *Life*, 13(10), 2007.
- Song, Z., Li, S., Li, Y., Zhou, X., Liu, X., Yang, W., & Chen, R. (2024). Identification and characterization of yellow stripe-like genes in maize suggest their roles in the uptake and transport of zinc and iron. *BMC Plant Biology*, 24(1), 3.
- Stangoulis, J. C., Huynh, B. L., Welch, R. M., Choi, E. Y., & Graham, R. D. (2007). Quantitative trait loci for phytate in rice grain and their relationship with grain micronutrient content. *Euphytica*, 154(3), 289-294.

- Tadele, Y. (2015). Important anti-nutritional substances and inherent toxicants of feeds. *Food science and quality management*, 36, 40-47.
- Tessema, A. M., Abebe, F. M., Kidane, Y. G., Hailegiorgis, D., Tehulie, N. S., Hassen, A., ... & Ibrahim, S. (2026). Crop biofortification for enhanced nutritional density: Breeding, agronomical, and biotechnological strategies. *Crop Science*, 66(1), e70246.
- Tomasiewicz, A., Polański, J., & Tański, W. (2024). Advancing the understanding of malnutrition in the elderly population: current insights and future directions. *Nutrients*, 16(15), 2502.
- Tsai, H. H., & Schmidt, W. (2017). Mobilization of iron by plant-borne coumarins. *Trends in Plant Science*, 22(6), 538-548.
- Tsakirpaloglou, N., Bueno-Mota, G. M., Soriano, J. C., Arcillas, E., Arines, F. M., Yu, S. M., ... & Slamet-Loedin, I. H. (2023). Proof of concept and early development stage of market-oriented high iron and zinc rice expressing dicot ferritin and rice nicotianamine synthase genes. *Scientific Reports*, 13(1), 676.
- Tyagi, D., Banoo, H., Meena, V., Joon, R., Agrwal, K., Kumar, A., ... & Pandey, A. K. (2025). CRISPR/Cas9 editing of the wheat iron sensor TaHRZ1 confirms its conserved role in iron homeostasis and allocation in grains. *bioRxiv*, 2025-06.
- Vigani¹, G., & Hanikenne, M. (2017). Metal homeostasis in plant mitochondria. *Annual Plant Reviews, Plant Mitochondria*, 111.
- Wessling-Resnick, M. (2017). Iron: Basic nutritional aspects. In *Molecular, genetic, and nutritional aspects of major and trace minerals* (pp. 161-173). Academic Press.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New phytologist*, 182(1), 49-84.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New phytologist*, 182(1), 49-84.
- Xu, C., Wang, L., Yin, J., Qi, L., Feng, Y., Ji, Y., ... & Li, J. (2024). Wild relatives and new breeding techniques sustain Fe and Zn biofortified crop farming systems under climate change and emergencies. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2354475.
- Xu, Y., & Crouch, J. H. (2008). Marker-assisted selection in plant breeding: From publications to practice. *Crop science*, 48(2), 391-407.
- Yang, H., Ren, S., Yu, S., Pan, H., Li, T., Ge, S., ... & Xia, N. (2020). Methods favoring homology-directed repair choice in response to CRISPR/Cas9 induced-double strand breaks. *International journal of molecular sciences*, 21(18), 6461.
- Yoneyama, T. (2021). Iron delivery to the growing leaves associated with leaf chlorosis in mugineic acid family phytosiderophores-generating graminaceous crops. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(4), 415-426.
- Zhang, Y., Shi, R., Rezaul, K. M., Zhang, F., & Zou, C. (2010). Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(23), 12268-12274.

Zhou, C. X., Zhang, C. C., Zhao, Q. Y., Yu, B. G., Zhang, W., Chen, X. P., & Zou, C. Q. (2024). Iron biofortification and yield of wheat grain in response to Fe fertilization and its driving variables: A meta-analysis. *Global Food Security*, 40, 100737.

BAZI ÇİLEK ÇEŞİTLERİNİN KALİTE ÖZELLİKLERİ VE FARKLI KURUTMA YÖNTEMLERİNİN KURU MADDE İÇERİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Arş. Gör. Merve KARAKOYUN MUTLUAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi
merve.karakoyun@bilecik.edu.tr, 0000-0001-7438-4738

Zir. Müh. Enes Can AYDIN

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi
E-mail: en.can.ay@hotmail.com, 0009-0005-4912-2978

Doç. Dr. Sinem ÖZTÜRK ERDEM

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi
sinem.erdem@bilecik.edu.tr, 0000-0002-8978-0837

ÖZET

Bu çalışmada, Albion, Monterey ve San Andreas çilek çeşitlerinin kalite özellikleri incelemiş ve farklı kurutma yöntemlerinin (güneşte, gölgede ve 40°C, 50°C, 60°C etüvde kurutma) kuru madde içeriği üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Araştırma, 2024 yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yüksek tünel içerisinde yetiştirilen çilek çeşitlerinde fiziksel (meyve eni, boyu, ağırlığı, meyve eti sertliği), kimyasal (pH, titre edilebilir asitlik, suda çözünür kuru madde içeriği) ve kurutma sonrası toplam kuru madde miktarı belirlenmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek meyve eni ve ağırlığı San Andreas, en yüksek meyve boyu ise Albion çeşidinde elde edilmiştir. Kimyasal özellikler açısından en yüksek suda çözünür kuru madde içeriği San Andreas ve Monterey çeşitlerinde, en yüksek pH değeri San Andreas çeşidinde, en yüksek titre edilebilir asitlik ise Albion çeşidinde tespit edilmiştir.

Kurutma uygulamaları değerlendirildiğinde, en yüksek kuru madde içeriği güneşte ve gölgede kurutma yöntemleriyle elde edilmiştir. Özellikle Monterey çeşidinin, güneşte ve gölgede kurutma yöntemleriyle en yüksek kuru madde içeriğine ulaştığı belirlenmiştir. Kurutma sürecinde genetik faktörlerin yanı sıra çevresel koşulların da önemli rol oynadığı görülmüştür. Sonuç olarak, farklı çilek çeşitleri arasında incelenen parametreler anlamlı farklılıklar tespit edilmiş, en iyi kaliteyi koruyan kurutma yöntemi olarak güneşte ve gölgede kurutma ön plana çıkmıştır. Bu veriler, çilek kurutma sürecinde optimum koşulların belirlenmesi ve yüksek kaliteli kurutulmuş ürün üretimi açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: çilek, kalite, kurutma, meyve, nem içeriği

GİRİŞ

Türkiye, tarımsal üretim açısından verimli topraklara sahip olup, çeşitli meyve ve sebzelerin yetiştiriciliğine elverişli iklim koşullarına sahip bir ülkedir. Bu durum, geniş bir ürün yelpazesine olanak sağlamakta ve hasat edilen ürünlerde üretim fazlası oluştuğunda, raf ömrünün uzatılması ve kalite kaybının önlenmesi amacıyla etkin muhafaza yöntemlerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu yöntemler arasında, gıdalardaki suyun uzaklaştırılması esasına dayanan kurutma işlemi, meyve ve sebzelerin muhafazasında önemli bir yer tutmaktadır. Kurutma işlemi yalnızca ürünlerin nem içeriğini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda besin değerinin, duyu özelliklerinin ve fiziksel görünümünün korunmasına da katkıda bulunmakta; dolayısıyla yaygın olarak tercih edilen bir muhafaza yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Kowalska ve ark., 2018; Akharume ve ark., 2019).

Kurutma işlemi, geleneksel güneşte kurutma ve yapay kurutma teknikleri gibi farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Güneşte kurutma, düşük maliyetli bir yöntem olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmekle birlikte, ürünlerin çevresel faktörlere maruz kalmasına neden olarak renk değişimi ve besin kaybı gibi kaliteyi olumsuz etkileyen sorunlara yol açabilmektedir (Omolola ve ark., 2017). Buna karşılık, sıcak hava ile kurutma ve dondurarak kurutma gibi yapay kurutma yöntemleri, kontrollü ortam koşullarını sağlayarak söz konusu riskleri en aza indirmekte ve kurutulmuş ürünlerin kalite özelliklerini iyileştirmektedir.

Bilimsel adı *Fragaria × ananassa* olan çilek, yüksek besin değeri ve kendine özgü aroması nedeniyle dünya genelinde en çok tercih edilen meyvelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Çilek, A, B ve C vitaminlerinin yanı sıra kalsiyum, demir ve fosfor gibi temel mineraller bakımından zengin bir içeriğe sahiptir (Giampieri ve ark., 2012). Bu meyveye yönelik talebin artışı, yalnızca taze tüketimiyle sınırlı kalmayıp, reçel, jöle ve tatlı gibi işlenmiş gıda ürünlerinde yaygın olarak kullanılmasına da bağlanmaktadır (Čabilovski ve ark., 2023). Ayrıca, çileklerin ekonomik açıdan taşıdığı önem, özellikle diğer meyvelerin sınırlı olduğu mevsimlerde pazarlanabilirliğinin yüksek olmasıyla artmakta ve bu durum, üreticiler için kârlı bir fırsat sunmaktadır (Anderson ve Ponnusamy, 2023).

Çileklerin kurutulması, yalnızca raf ömrünü uzatmakla kalmayıp, aynı zamanda onları çeşitli gıda ürünleri için değerli bir bileşen haline getirmektedir. Kurutulmuş çilekler, yoğun aromaları ve besin değerleri sayesinde atıştırmalıklar ve tatlılar gibi farklı gıda ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Putri ve Falah, 2023). Bunun yanında, meyvelerde kurutma işleminin renk,

doku ve besin içeriği gibi fizikokimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirebildiğini ortaya koymaktadır (Omolola ve ark., 2017).

Bununla birlikte, tercih edilen kurutma yöntemi, ürünün duyu özellikleri üzerinde de belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle taze çileklere tat ve besin değeri açısından daha yakın özellikler taşıyan kurutulmuş ürünleri tercih eden tüketiciler açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, kurutma süreci boyunca çileklerin antioksidan özelliklerinde artış gözlemlenmekte olup, bu durum çilekleri kanserin önlenmesi ve kardiyovasküler sağlığın desteklenmesi gibi çeşitli sağlık yararları sunan fonksiyonel bir gıda bileşeni haline getirdiği bilinmektedir (Wojdyło ve ark., 2009).

Sonuç olarak, çileklerin kurutulması, tarımsal üretim ve gıda muhafazası açısından önemli bir süreci temsil etmektedir. Uygun kurutma yöntemlerinin kullanılmasıyla, çileklerin besin kalitesinin ve özelliklerinin korunması ayrıca raf ömürlerinin uzatılmasını mümkün hale getirmektedir. Kurutulmuş meyvelere yönelik talep artış göstermeye devam ederken, farklı kurutma tekniklerinin çileklerin kalite özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılması, üreticilerin tüketici beklentilerini karşılaması ve gıda güvenliği standartlarını sürdürmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Biyoaktif bileşiklerin korunmasını en üst düzeye çıkarmak ve kontaminasyon riskini en aza indirmek amacıyla kurutma süreçlerinin optimizasyonuna dikkat edilmelidir (Putri ve Falah, 2023). Bu çalışmada Albion, Monterey ve San Andreas çilek çeşitleri kullanılarak etüvde, güneşte ve gölgede kurutma yöntemleri uygulanmış ve en az kalite kaybına neden olan yöntem belirlenerek kurutulmuş ürünlerin kalite parametreleri değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (40°06'48.3''K, 30°00'08.4''D) bulunan yüksek tünel sera içerisinde ve laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma amacıyla kullanılan Albion, Monterey ve San Andreas çilek çeşitleri frigo fide olarak Çiltar A.Ş'den temin edilmiştir. Albion çeşiti, Diamante X Cal 94.16-1 arasındaki melezlemesinden elde edilmiş olup, Diamante ve Aromas çeşitlerinin iyi özelliklerinden oluşan kaliteli bir çeşittir. Nötr gün çeşidi olup, özellikle serin ve ılıman bölgelere adaptasyonu iyidir (Ateş ve Türemiş, 2015; Kandemir, 2016). Monterey (Albion × Cal 97.85-6) çeşidi, orta derecede nötr gün çeşididir. Meyve tadı düşük asitliğe sahip olmasından dolayı çok iyi olan bu çeşit, iri ve yumuşak meyvelere sahiptir. Meyvelerinin iriliği nedeniyle tüm dünyada tüketiciler tarafından tercih edilmektedir (Ateş ve Türemiş, 2015; Kandemir, 2016). San Andreas (Albion × Cal. 97.86-1) çeşidi de orta derecede nötr gün çeşidi

olup meyveleri güzel bir görünüme sahip, tadı iyi ve iri bir çeşittir. Bitki gücü fazla olup, hastalıklara karşı dayanıklı olduğu bilinmektedir (Kandemir, 2016; Erdem ve Çekiç; 2017).

Fidelerin dikimi için masura genişlikleri 70 cm, masura aralıkları 25 cm olacak şekilde masura yapılarak üzeri siyah sera taban örtüsü ile kaplanmıştır. Dikim masuralar üzerine 25 cm aralıklarla üçgen dikim şeklinde gerçekleştirilmiştir. Düzenli olarak hasat edilen meyvelerde, fiziksel, kimyasal ve kuru madde tayini için ölçüm ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Meyvelerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla, çalışma sonunda, her çeşite ait çileklerin meyve boyu ölçümü (cm), meyve eni ölçümü (mm), meyve ağırlıklarının belirlenmesi (g) ve meyve eti sertlikleri (kg/cm²) belirlenmiştir (Türemiş, 2003; Oğuz ve ark., 2017).

Meyvelerin kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla suda çözünür kuru madde içeriği (SÇKM), pH, titre edilebilir asitlikleri (TEA) belirlenmiştir (Cemeroğlu, 2007).

Kurutma denemesi, 2023 yılı temmuz ayı içerisinde, güneşlenmenin en yoğun ve yağış riskinin en düşük olduğu periyotta Bilecik ilinde yürütülmüştür. Bilecik Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan veriler incelendiğinde; 2023 yılı temmuz ayının, önceki yıla kıyasla daha yüksek bir sıcaklık ortalaması (≈25°C) olduğu belirlenmiştir. Düşük yağış miktarı ve yüksek sıcaklık değerleri, kurutma süreci için gerekli olan yüksek evaporasyon hızını desteklemiştir. Kuru madde tayini ise hasat edilen meyvelerin arasından sağlıklı olanlar seçilip 50 ile 60 g arasında tartılmıştır. Ardından petrilere alınan meyveler güneşte, gölgede ve etüvde (40, 50, 60 °C) ağırlık sabitlenene kadar tutulmuştur.

Kurutulacak çilek meyvelerinin başlangıç nem değerleri ile kurutma sonrası son nem değerleri kurutma dolabı yöntemiyle belirlenmiştir. 70°C sıcaklıkta ağırlıkları sabitlenene kadar kurutma dolabında bekletilen örneklerin nem içerikleri, aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Yağcıoğlu, 1999).

$$Nk = \frac{Wi - Ws}{Ws} \times 100$$

Nk: Kuru baza göre nem (%)

Wi : İlk ağırlık (g)

Ws : Son ağırlık (g)

Elde edilen sonuçlar kapsamındaki tüm veriler %5 anlamlılık düzeyinde (p < 0.05) varyans analizine tabi tutulmuş ve anlamlı fark gösteren ortalamalar Tukey'in çoklu karşılaştırma testi kullanılarak Minitab yazılımı ile karşılaştırılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Arazi koşullarında yetiştirilen çilek çeşitlerine ait meyvelerin en, boy, meyve eti sertliği ve meyve ağırlıkları, suda çözünür kuru madde (SÇKM), pH, titre edilebilir asitlik (TEA) ait veriler Tablo 1’de verilmiştir. En yüksek meyve eni Monterey (26.8 mm) ve San Andreas (26.6 mm) çeşitlerinden elde edilirken, en yüksek meyve boyu 34.61 mm Albion çeşitinden elde edilmiştir. Verim ve kaliteyi etkileyen meyve eni ve boyu bakımından farklılıklar gözlenmekte ve daha fazla sayıda tohumun döllemesini kolaylaştıran ve dolayısıyla daha büyük meyve boyutuna katkıda bulunan optimum tozlaşma koşullarından faydalanabildiğinden meyve boyu bakımından üstün özellik gösteren çeşitler bulunmaktadır (Dung ve ark., 2021). Hem meyve eni hem de meyve boyu bakımından genetik faktörler, çilek çeşitleri arasındaki meyve boyutu varyasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Farklı çilek çeşitlerinin genetik yapıları nedeniyle meyve verimi, sayısı ve boyutu açısından önemli farklılıklar sergilediğini göstermiştir (Mishra ve ark., 2015). Hancock ve Bringham (1988), farklı çeşitler arasında meyve boyutu için önemli bir genetik değişkenlik tanımlamıştır. Belirli özellikler için seçilimin gelişmiş meyve boyutlarına yol açabileceğini göstermiştir (Mishra ve ark., 2015). Elde edilen bulgulara göre bu bulguları desteklemekte ve genetik faktöre bağlı olarak çeşitler arasında meyve en ve boyunun değiştiği düşünülmektedir.

Çileklerin sertliği, öncelikle hücre duvarı bileşenlerinin, özellikle de meyvenin dokusunu ve genel kalitesini belirlemede kritik roller oynayan pektin, selüloz ve hemiselülozun bileşimi ve bozunmasından etkilenmektedir. Meyvelerin gelişme sırasında yumuşamasının, hemiselülozun bozunmasından ziyade pektinin çözünmesi ve depolimerizasyonu ile yakından ilişkili olduğu bilinmektedir (Anees ve ark., 2021). Üç farklı çilek çeşitinin meyve eti sertliklerine ait değerler Tablo 1’de verilmiştir. En yüksek meyve eti sertliğine 29.05 kg/cm² ile San Andreas çilek çeşitinden elde edilmiştir.

Meyve ağırlıklarının çeşitler arasında 12.73 g ile 19.76 g arasında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 1). Meyve ağırlıkları bakımından üç çilek çeşiti arasında en yüksek ağırlık 19.76 g ile San Andreas çilek çeşitinden elde edilmiştir (Tablo 1). Çileklerin meyve ağırlığının çeşit farklılığından ayrıca çevre koşullarından da etkileneceği bilinmektedir. Bir çalışmada Albion çeşidinin ortalama meyve ağırlığının (16.33 g) Camarosa, Amiga ve Sabrina gibi diğer çeşitlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Çolak, 2023). Çilek meyve ağırlığının, çeşit seçimi, tozlaşma verimliliği, mikrobiyal etkileşimler ve çevresel yönetim uygulamalarının kombinasyonundan etkilendiği bilinmektedir. Bu faktörlerin etkileşimi, çilek meyvelerinin

genel verimini ve kalitesini belirlemekte ve çilek yetiştiriciliğinde bütünleşik bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır (Diel ve ark., 2018).

Çilek çeşitlerinin suda çözünür kuru madde içerikleri (SÇKM), çilek meyvesinin tadını ve genel lezzet profilini etkileyen kritik bir parametredir. Yüksek SÇKM oranı genellikle daha iyi lezzet ve tüketici tercihi ile korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir (Schwieterman ve ark., 2014; Fan ve ark., 2021). Tablo 1’de bu çalışma sonucunda elde edilen SÇKM miktarları verilmiştir. En iyi suda çözünür kuru madde içeriği (%) San Andreas (%9.62) ve Monterey (%9.18) çeşitlerinden elde edilmiştir. Organik tarım uygulamalarının çileklerde SÇKM’yi artırdığı bilinmekte ve buna benzer yetiştirme koşulları altında San Andreas ile karşılaştırıldığında Monterey’de gözlemlenen daha yüksek değer elde edildiği bildirilmektedir (Domingues ve ark., 2018). Üç farklı çilek çeşiti arasında en yüksek pH içeriği 3.86 ile San Andreas çeşitinden elde edilmiştir (Tablo 1). Çileklerdeki birincil organik asitler, meyvenin genel asitliğini ve dolayısıyla pH seviyesini belirlemede önemli bir rol oynayan sitrik ve malik asitlerdir (Janurianti ve ark., 2021). Özdemir ve ark. (2003), Hatay koşullarında yürüttükleri bir çalışmada pH’nın 3.32–3.60 arasında, Oğuz ve ark. (2017) ise yaptıkları çalışmada 3.61-3.85 arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Çileklerin titre edilebilir asitliği (TEA), lezzetini, kalitesini ve genel tüketici isteklerini etkileyen kritik bir parametredir. Sitrik asit, çilek meyvesinde bulunan baskın organik asit olduğundan, titre edilebilir asitlik, toplam sitrik asit miktarı cinsinden ifade edilir (Abd-Elhady, 2014). Farklı çilek çeşitleri arasındaki TEA değişimleri genetik faktörlere, çevre koşullarına ve hasat sonrası işlem uygulamalarına bağlanabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, Albion çilek çeşiti en yüksek TEA içeriğine sahip olurken en düşük TEA içeriği 1.34 ile Monterey çeşidinde belirlenmiştir (Tablo 1). Çalışmamızla benzer şekilde Oğuz ve ark (2017), çeşitler arasında en yüksek TEA içeriğine Albion çeşidinden elde ettiğini bildirmiştir.

Tablo 1. Çilek çeşitlerinin fiziksel analizlerinin sonuçları

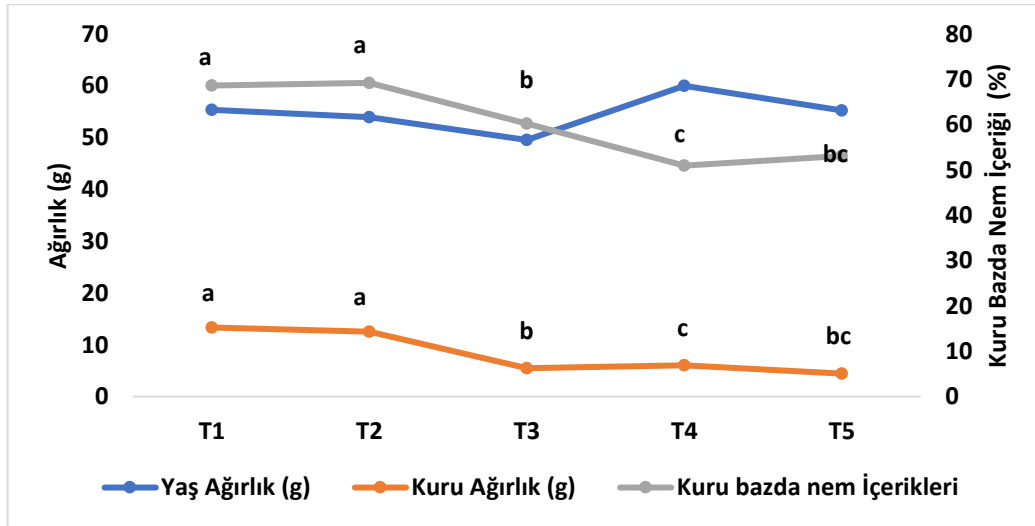
Çeşitler	Meyve boy (mm)	Meyve en (mm)	Meyve Sertlik (kg/cm ²)	Meyve Ağırlık (g)	SÇKM	pH	TEA (%)
Albion	19.19 b	34.61 a	21.96 b	14.79 b	8.84 b	3.02 b	2.62 a
Monterey	26.8 a	25.43 c	20.88 b	12.73 b	9.18 ab	3.16 b	1.34 c
San Andreas	26.6 a	29.25 b	29.05 a	19.76 a	9.62 a	3.86 a	1.64 b

Bu çalışma sonucunda, farklı kurutma uygulamaların (T1: Güneş, T2: Gölge, T3: Etüv-40 °C, T4: Etüv-50 °C, T5: Etüv-60 °C) bitki taze ağırlığı, kuru ağırlığı ve nem içeriği üzerindeki

etkilerinin istatistiksel olarak önemli ($p < 0.05$) olduğu bulunmuştur. Elde edilen verilere göre, Güneş (T1) ve gölge (T2) uygulamaları hem kuru ağırlık hem de kuru bazda nem oranı bakımından en yüksek değerleri göstermiştir. En iyi kuru madde içerikleri güneş (T1) (%68.58) ve gölge (T2) (%69.19) kurutma tekniklerinde belirlenmiştir. Güneş ve gölge kurutma yöntemi karşılaştırıldığında, bu yöntemlerin etüvde kurutmaya göre daha yüksek kuru madde içeriği sağlayabildiği gözlemlenmiştir.

Uygulama düzeylerinin değişmesiyle birlikte (T3'ten itibaren), incelenen parametrelerde belirgin bir düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle T4 (Etüv-50) uygulamasında taze ağırlık değerlerinde bir artış kaydedilmesine rağmen, kuru ağırlık ve nem içeriğinin en düşük seviyelerde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; T4 uygulamasının hücre içi su hacminde geçici bir artış sağlasa da yapısal biyokütle birikimi ve oransal su tutma kapasitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1 . Farklı kurutma uygulamalarının kuru madde içerikleri

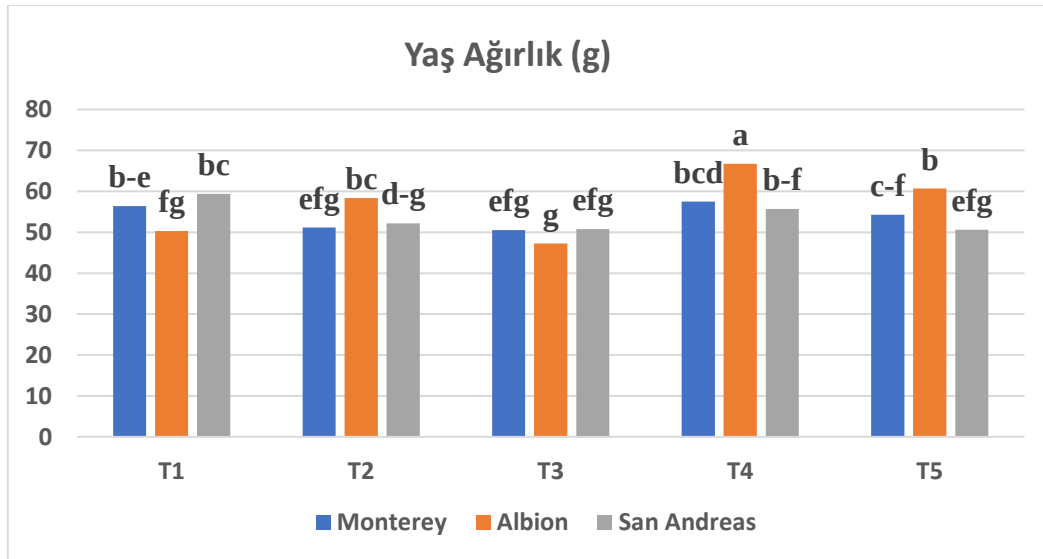


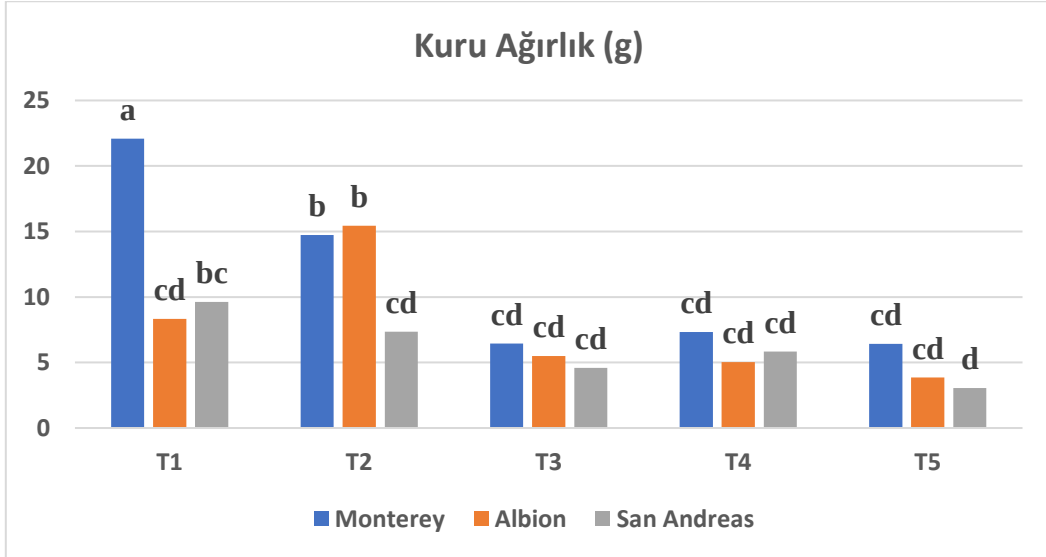
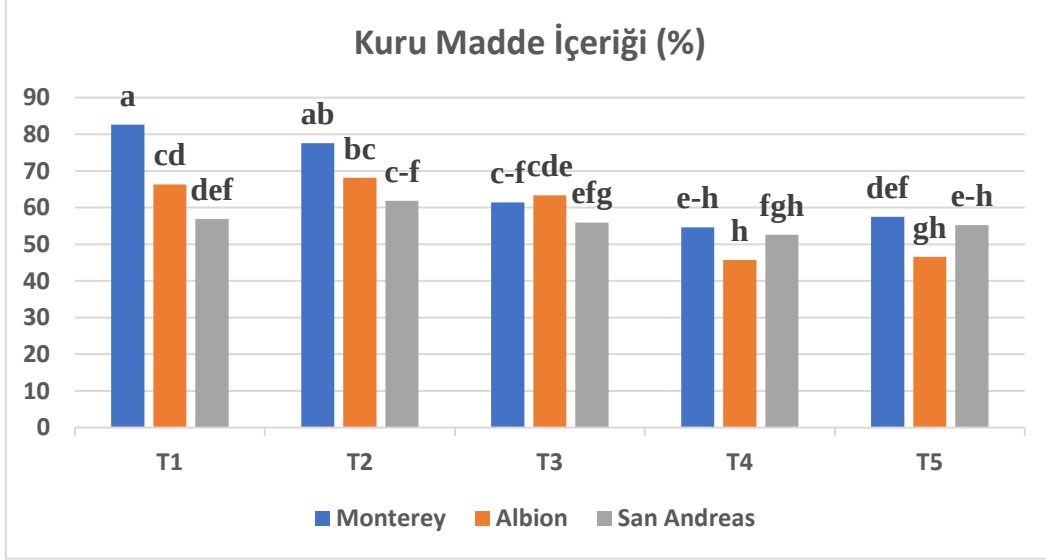
Grafikte yer alan her bir parametre (yaş ağırlık, kuru ağırlık ve kuru bazda nem kendi içerisinde istatistiksel olarak analiz edilmiş ve birbirinden bağımsız olarak harflendirilmiştir. Çizgiler üzerindeki farklı harfler, Tukey testi sonuçlarına göre $p < 0.05$ önem düzeyinde istatistiksel farkı temsil etmektedir. Uygulamalar, **T1**: Güneşte Kurutma, **T2**: Gölgede Kurutma, **T3**: 40 °C etüvde kurutma, **T4**: 50 °C etüvde kurutma, **T5**: 60 °C etüvde kurutma şeklindedir.

Çeşit × kurutma interaksiyon sonuçlarına göre, elde edilen meyvelerin taze ağırlıkları, T4 (Etüv-50) uygulamasının özellikle Albion çeşidinde belirgin bir üstünlük sağladığı görülmektedir. Çizelge 2’de verilen kuru madde içeriklerine göre en yüksek kuru madde içeriğine Monterey × T1 (Güneş) (%82.59) ve Monterey × T2 (Gölge) (%77.57) uygulamalarından elde edilmiştir (Çizelge 2). Monterey çeşidinde farklı kurutma koşulları altında gözlemlenen kuru madde içeriğindeki önemli farklılıklar, çevresel etmenler için uygun

çeşitlerin seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca toprak kalitesinin, nem seviyelerinin ve besin maddesi bulunabilirliğinin de ürünlerdeki kuru madde birikiminde önemli roller oynadığını göstermiştir (Baafi ve ark., 2015). Genotip ve çevre koşulları arasındaki interaksiyon, patates çeşitleri üzerinde yapılan araştırmalarda da kuru madde ve nişasta içeriğinde değişikliklere yol açtığı belirlenmiştir (Asmamaw ve ark., 2010; Gościnnna ve ark., 2024). Bu nedenle, Monterey gibi yüksek performanslı çeşitlerin seçimiyle birlikte etkili yönetim stratejilerinin entegre edilmesi kuru madde verimini daha da artırabilmektedir. Dahası, yüksek kuru madde içeriğinin etkileri sadece verimi değil aynı zamanda ürünün kalitesini ve pazarlanabilirliğini de etkilemektedir. Yüksek kuru madde içeriği genellikle daha iyi doku, lezzet ve besin değeri ile ilişkilendirilir ve bu da ürünleri tüketiciler için daha çekici hale getirmektedir (Radzevicius ve ark., 2016). Monterey çeşidinin hem güneş hem de gölge uygulamalarında en yüksek kuru madde içeriğine ulaştığını gösteren sonuçlar, çilek üretiminde genetik, çevresel koşulları karşısında tarımsal uygulamaları optimize etmek ve gıda güvenliğini iyileştirmek ve dolaylı olarak kuru madde içeriği artışında da önemli olacaktır.

Çizelge 2. Çeşit kurutma yöntemi interaksiyonunun taze ağırlık (g), kuru ağırlık (g) ve kuru madde üzerindeki nem oranlarına (%) etkisi





Çizgiler üzerindeki farklı harfler, Tukey testi sonuçlarına göre $p < 0.05$ önem düzeyinde istatistiksel farkı temsil etmektedir. Uygulamalar, **T1**: Güneşte Kurutma, **T2**: Gölgede Kurutma, **T3**: 40 °C etüvde kurutma, **T4**: 50 °C etüvde kurutma, **T5**: 60 °C etüvde kurutma şeklindedir.

4.SONUÇ

Sonuç olarak, çileklerin kurutulması, raf ömrünü uzatırken kalite açısından da korunmasını sağlayan etkili bir muhafaza yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ancak kurutma yöntemi ve çeşit seçimi, ürün kalitesini belirlemede kritik bir faktördür. Çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, güneşte ve gölgede kurutma, çilek muhafazasında öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, tüketicilere yüksek kaliteli kurutulmuş çilek sunulabilmesi açısından üreticilere ve araştırmacılara bilgiler sağlamaktadır.

Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmaların, çilek kurutma yöntemlerinin optimizasyonuna ve ürün kalitesinin korunmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesine odaklanması önem arz etmektedir.

Bu kapsamda, farklı sıcaklık ve bağıl nem koşullarında gerçekleştirilen kurutma işlemlerinin çileklerin fiziksel, kimyasal ve besinsel özellikleri üzerindeki etkilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi, gıda endüstrisinde daha verimli ve yüksek kaliteli kurutma uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Böylelikle, tüketici beklentilerini karşılayan, besin değerini büyük ölçüde muhafaza eden ve ticari açıdan uygulanabilir kurutma tekniklerinin geliştirilmesi mümkün olabilecektir.

Ayrıca gelecekte yapılacak araştırmaların, bu çalışmanın bulgularını destekleyici nitelikte olarak farklı çilek çeşitlerinde kuru madde içeriğinin artırılmasına yönelik yetiştirme programlarının potansiyelinin değerlendirilmesine odaklanması da önemli görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmaya desteklerinden dolayı (TÜBİTAK 2209-A) TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abd-Elhady, M. 2014. Effect of citric acid, calcium lactate and low temperature prefreezing treatment on the quality of frozen strawberry. *Annals of Agricultural Sciences*, 59(1), 69-75.
- Akharume, F., Smith, A., Sivanandan, L. ve Singh, K., 2019, Recent progress on osmo-convective dehydration of fruits, *Journal of Food Science & Technology*, 4 (9), 956-969.
- Anderson, K. ve Ponnusamy, S., 2023, Structural transformation away from agriculture in growing open economies, *Agricultural Economics*, 54 (1), 62-76.
- Anees, M., Gao, L., Umer, M. J., Yuan, P., Zhu, H., Lu, X., He, N., Gong, C., Kaseb, M. O. ve Zhao, S., 2021, Identification of key gene networks associated with cell wall components leading to flesh firmness in watermelon, *Frontiers in plant science*, 12, 630243.
- Ansarif, E., & Moradinezhad, F. 2021. Preservation of strawberry fruit quality via the use of active packaging with encapsulated thyme essential oil in zein nanofiber film. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(9), 4239-4247.
- Asmamaw, Y., Tekalign, T. ve Workneh, T. S., 2010, Specific gravity, dry matter concentration, pH, and crisp-making potential of Ethiopian potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars as influenced by growing environment and length of storage under ambient conditions, *Potato Research*, 53, 95-109.
- Ateş, S. ve Türemiş, F., 2015, Nevşehir ili organik çilek yetiştiriciliğinde kullanılabilecek farklı gübre ve malç materyallerinin verim ve kalite özellikleri üzerine etkileri, *Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*.
- Baafi, E., Manu-Aduening, J. A., Carey, E. E., Ofori, K., Blay, E. T., & Gracen, V. E. 2015. Constraints and breeding priorities for increased sweetpotato utilization in Ghana.
- Čabilovski, R., Manojlović, M. S., Popović, B. M., Radojčin, M. T., Magazin, N., Petković, K., Kovačević, D. ve Lakićević, M. D., 2023, Vermicompost and vermicompost leachate application in strawberry production: Impact on yield and fruit quality, *Horticulturae*, 9 (3), 337.
- Cemeroğlu, B. (2007). Gıda analizleri. *Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları*, 34, 168-171.
- Çolak, A., 2023, Determination of Yield and Quality Characteristics of Some Strawberry Varieties in Uşak Ecological Conditions, *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 16 (3), 918-927.
- Diel, M. I., Pinheiro, M. V. M., Cocco, C., Caron, B. O., Fontana, D. C., Meira, D. ve Schmidt, D., 2018, Yield and quality performance of Italian and American strawberry genotypes in Brazil, *Journal of Agricultural Science*, 10 (2), 139-147.
- Domingues, A. R., Vidal, T. C. M., Hata, F. T., Ventura, M. U., Gonçalves, L. S. A. ve Silva, J. B. d., 2018, Postharvest quality, antioxidant activity and acceptability of strawberries grown in conventional and organic systems, *Brazilian Journal of Food Technology*, 21, e2017154.
- Dung, C. D., Wallace, H. M., Bai, S. H., Ogbourne, S. M. ve Trueman, S. J., 2021, Cross-pollination affects fruit colour, acidity, firmness and shelf life of self-compatible strawberry, *Plos one*, 16 (9), e0256964.
- Erdem, S. Ö. ve Çekiç, Ç., 2017 Geçmişten Günümüze Çilek Islahı, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6 (3), 105-115.
- Fan, Z., Plotto, A., Bai, J. ve Whitaker, V. M., 2021, Volatiles influencing sensory attributes and Bayesian modeling of the soluble solids–sweetness relationship in strawberry, *Frontiers in plant science*, 12, 640704.

- Giampieri, F., Tulipani, S., Alvarez-Suarez, J. M., Quiles, J. L., Mezzetti, B. ve Battino, M., 2012, The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health, *Nutrition*, 28 (1), 9-19.
- Gościńska, K., Retmańska, K., Wszelaczyńska, E. ve Pobereźny, J., 2024, Influence of Edible Potato Production Technologies with the Use of Soil Conditioner on the Nutritional Value of Tubers, *Agronomy*, 14 (3), 549.
- Hancock, J. F., & Bringham, R. S. (1988). Yield component interactions in wild populations of California *Fragaria*. *HortScience*, 23(5), 889-891.
- Janurianti, N. M. D., Utama, I. M. S. ve Gunam, I. B. W., 2021, Colour and quality of strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch.) at different levels of maturity, *SEAS (Sustainable Environment Agricultural Science)*, 5 (1), 22-28.
- Kandemir, A., 2016, Bazı çilek çeşitlerinin örtüaltında performanslarının belirlenmesi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun*, 79.
- Kowalska, J., Kowalska, H., Marzec, A., Brzeziński, T., Samborska, K. ve Lenart, A., 2018, Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack, *Food science and biotechnology*, 27, 799-807.
- Mishra, P. K., Ram, R. B. ve Kumar, N., 2015, Genetic variability, heritability, and genetic advance in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.), *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39 (3), 451-458.
- Omolola, A. O., Jideani, A. I. ve Kapila, P. F., 2017, Quality properties of fruits as affected by drying operation, *Critical reviews in food science and nutrition*, 57 (1), 95-108.
- Oğuz, H. İ., Zorlugenç, F. K., Zorlugenç, B., & Kafkas, E. (2017). Nevşehir iklim koşullarında yetiştirilen bazı çilek (*Fragaria x ananassa* L.) çeşitlerinin meyve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Bahçe*, 46(Özel Sayı 1) 5. Uluslararası Üzümsü Meyveler Sempozyumu), 303-310.
- Özdemir, E., K. Gündüz ve M. Şehitoğlu, 2003. Yayladağı (Hatay) Koşullarında Yetiştirilen Bazı Çilek Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Türkiye IV. Ulusal Bahçe Bitkileri Kongresi, Kongresi, 08–12 Eylül 2003, Antalya, 301–308.
- Putri, R. ve Falah, M., 2023, Effects of osmotic dehydration pre-treatment on process and quality of freeze-dried strawberries (*Fragaria x ananassa* var. Mencir), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012030.
- Radzevičius, A., Viskelis, J., Karklehenė, R., JUŠKEVIČIENĖ, D. ve VIŠKELIS, P., 2016, Determination of tomato quality attributes using near infrared spectroscopy and reference analysis, *Zemdirbyste-Agriculture*, 103 (1).
- Schwieterman, M. L., Colquhoun, T. A., Jaworski, E. A., Bartoshuk, L. M., Gilbert, J. L., Tieman, D. M., Odabasi, A. Z., Moskowitz, H. R., Folt, K. M. ve Klee, H. J., 2014, Strawberry flavor: diverse chemical compositions, a seasonal influence, and effects on sensory perception, *Plos one*, 9 (2), e88446.
- Wojdyło, A., Figiel, A. ve Oszmiański, J., 2009, Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits, *Journal of agricultural and food chemistry*, 57 (4), 1337-1343.
- Yağcıoğlu, A., 1999. Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No:536, ISBN: 975-483-400-8, İzmir.
- Türemiş, N. (2003). Yeni bazı çilek çeşitlerinin Kıbrıs koşullarındaki adaptasyonu. *Kktc/Tagep*, 5(3.4).

**PEYNİR ÜRETEN İŞLETMELERDE PEYNİR ALTI SUYUNUN
DEĞERLENDİRİLMESİNE İLİŞKİN YAKLAŞIMLARIN EKONOMİK VE
ÇEVRESEL ANALİZİ: BİR LİTERATÜR İNCELEMESİ**

Ziraat Mühendisi , NADİRE BUCAK

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü

bucaknadire@gmail.com - 0000-0002-5086-1584

Prof.Dr , NEVİN DEMİRBAŞ

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü

nevin.demirbas@ege.edu.tr - 0000-0002-0541-1437

Dr.Öğr.Üyesi , YARKIN AKYÜZ

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü

yarkin.akyuz@ege.edu.tr - 0000-0002-1220-9739

ÖZET

Süt sanayisinin en yaygın ve stratejik yan ürünlerinden biri olan peynir altı suyu (PAS), içerdiği laktoz, çözünür proteinler ve mineraller sayesinde yüksek bir ekonomik ve fonksiyonel değer taşıırken, barındırdığı yüksek biyolojik ve kimyasal oksijen ihtiyacı nedeniyle kontrolsüz bertarafı durumunda toprak ve su kaynakları üzerinde ciddi çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Bu çalışmanın amacı, PAS'ın gıda, tarım ve enerji sektörlerinde değerlendirilmesine yönelik Türkiye'deki mevcut durumu; AB ve ABD'deki kooperatif tabanlı toplama ağları ve kurumsal yönetim modelleri bağlamında karşılaştırmalı olarak incelemektir. Bu doğrultuda 2005-2024 yılları arasındaki literatür, uluslararası akademik veri tabanları üzerinden analitik bir yaklaşımla incelenerek sentezlenmiştir. Elde edilen bulgular; gelişmiş ülkelerde PAS'ın sistematik toplama ağları ve kooperatif tabanlı modellerle yüksek katma değerli ürünlere (protein izolatları, biyogaz vb.) dönüştürüldüğünü, Türkiye'de ise teknik bilgi birikimi ve yüksek üretim potansiyeline rağmen merkezi toplama sistemlerinin yokluğu ve Organize Sanayi Bölgeleri'nin (OSB) geri kazanımdan ziyade bertaraf odaklı altyapısı nedeniyle sürecin parçalı ve düşük katma değerli kaldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, PAS'ın çevresel bir yük olmaktan çıkarılarak katma değer yaratan bir üretim girdisi hâline dönüştürülmesi için bölgesel toplama merkezleri, sektörel kümelenme modelleri ve bunları destekleyen stratejik teşvik mekanizmaları ve bütüncül altyapı araçlarının geliştirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Peynir altı suyu, Peynir altı suyu değerlendirmesi (Whey valorization), Süt sanayi yan ürünleri, Atık yönetimi

1.GİRİŞ

Sürdürülebilir üretim yaklaşımlarının giderek önem kazanması, gıda sanayinde üretim süreçlerinde ortaya çıkan yan ürünlerin değerlendirilmesini önemli bir araştırma alanı haline getirmiştir. Süt ve süt ürünleri sanayii, tarıma dayalı sanayiler arasında üretim hacmi, istihdam kapasitesi ve ekonomik katkısı açısından önemli bir yere sahiptir. Bu sektör üretimi içerisinde peynir üretimi hem Türkiye’de hem de dünya genelinde süt sanayiinin en yaygın ve katma değeri yüksek üretim alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Peynir üretiminin doğal bir çıktısı olan peynir altı suyu ise uzun yıllar boyunca ekonomik potansiyeli yeterince dikkate alınmayan ve çoğunlukla çevresel bir atık olarak değerlendirilen bir yan ürün niteliği taşımıştır (Konar, 1978; Demirci ve Arıcı, 1989). Peynir altı suyu (PAS), peynir veya kazein üretimi sırasında pıhtılaşan kısımdan ayrılan ve sütün yaklaşık %85–90’ını oluşturan yeşil-sarı renkli sıvı bir serumdur. Laktoz, çözünür proteinler ve mineral maddeler bakımından zengin bir bileşime sahiptir (Yüksel ve ark., 2019). Peynir altı suyu (PAS), yüksek laktoz içeriği nedeniyle çok yüksek Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) değerlerine sahip olup önemli bir çevre kirleticisi olarak kabul edilir. Kirlilik yükü oldukça yüksektir; BOİ değeri tipik bir şehir kanalizasyonundan yaklaşık 175 kat fazladır ve 4.000 litre PAS, yaklaşık 1.900 kişinin fekal (evsel atık su) atığına eşdeğer çevresel etki yarattığı kabul edilmektedir (Bolwig et al., 2019; Schaefer ve ark., 2023). PAS su kaynaklarına karıştığında mikroorganizmalar tarafından parçalanırken sudaki oksijeni hızla tüketir ve bu durum ötrofikasyona (su ortamında besin maddesi birikimi) yol açarak sucul canlıların ölmesine neden olabilmektedir. Ayrıca bozunma sürecinde kötü kokular oluştururken, tarım arazilerine kontrolsüz verildiğinde toprakta oksijen tüketimi, tuz birikimi ve ürün kayıplarına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra korozif (aşındırıcı) yapısı ise altyapı ve su yollarında fiziksel ve kimyasal hasar oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerle PAS’ın arıtılmadan çevreye bırakılması birçok ülkede sıkı çevre mevzuatlarıyla yasaklanmıştır (Papademas and Kotsaki, 2019).

Peynir altı suyu yalnızca çevresel bir risk değil, aynı zamanda gıda, enerji ve biyoteknoloji sektörlerinde değerlendirilebilecek önemli bir endüstriyel hammadde niteliği taşımaktadır. Dünya genelinde sürdürülebilir üretim ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarının stratejik önem kazanmasıyla birlikte, süt sanayiinin en kritik yan ürünü olan peynir altı suyunun (PAS) yönetimi bir "atık bertarafı" meselesinden ziyade "kaynak yönetimi" olarak ele alınmaya başlanmıştır. Avrupa ve ABD örneklerinde PAS yönetimi; kamusal bir atık sistemi yerine kooperatif tabanlı, sözleşmeli ve bölgesel organizasyonlar aracılığıyla stratejik bir ara ürün olarak yönetilmektedir. Bu ülkelerde toplama ve lojistik süreçleri belirli standartlara göre planlanmakta ve PAS, merkezi işleme tesislerine yönlendirilen ekonomik değeri yüksek bir hammadde olarak kabul edilmektedir. Buna karşın Türkiye ölçeğinde bakıldığında, PAS’ın fiili değerlendirme kapasitesine ilişkin düzenli veri setlerinin bulunmaması gelişim sürecinin takibini zorlaştırmaktadır. Yerel ve özel sektör odaklı başarılı lojistik ağları mevcut olsa da bu uygulamalar henüz ülke genelinde kurumsallaşmış bir yapıya kavuşamamıştır. Özellikle Türkiye’deki Organize Sanayi Bölgelerinin (OSB) mevcut altyapısının sadece "atık su arıtımı ve bertarafı" üzerine kurgulanmış olması, PAS’ın ekonomik bir hammadde olarak geri kazanımını yapısal olarak kısıtlamaktadır. Mevcut literatür incelendiğinde ise çalışmaların

büyük oranda teknik süreçlere ve laboratuvar ölçekli yöntemlere odaklandığı; ancak ekonomik sürdürülebilirlik ile kurumsal yönetim modellerini sentezleyen kaynakların sınırlı olduğu görülmektedir. Buna rağmen mevcut literatürde peynir altı suyunun değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların büyük ölçüde teknik süreçler ve laboratuvar ölçekli uygulamalara odaklandığı; ekonomik sürdürülebilirlik ve organizasyonel yönetim modellerini birlikte ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda mevcut literatürdeki teknik odaklı yaklaşımın ötesine geçilerek, peynir altı suyu yönetiminin ekonomik ve çevresel boyutlarının organizasyonel yapılar çerçevesinde değerlendirilmesi önem kazanmaktadır. Bu çalışma, peynir altı suyunun (PAS) yönetimini ekonomik ve çevresel analiz perspektifiyle ele alarak Türkiye’deki mevcut durumun organizasyonel yapı üzerinden değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Araştırma kapsamında Avrupa Birliği ve ABD’de uygulanan Merkezi Toplama, Bölgesel İşleme ve Sektörel Simbiyoz olmak üzere üç temel kooperatif ve kümelenme modelinin Türkiye ölçeğine uyarlanabilirliği karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışma, peynir altı suyunun ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirilmesine yönelik ulusal ve uluslararası literatürün sistematik olarak incelendiği nitel bir araştırma niteliğindedir. Araştırmada 2005–2024 yılları arasında yayımlanan akademik çalışmalar, raporlar ve istatistiksel veri kaynakları incelenmiştir. Literatür taraması Web of Science, Scopus ve Google Scholar veri tabanlarında gerçekleştirilen aramalar yoluyla yapılmıştır. Tarama sürecinde “whey utilization”, “whey valorization”, “dairy by-products”, “whey management”, “circular economy dairy sector” ve “peynir altı suyu değerlendirilmesi” gibi anahtar kelimeler kullanılmıştır. İlk aşamada elde edilen çalışmalar başlık ve özetleri açısından incelenmiş, konu ile doğrudan ilişkili olmayan çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. İkinci aşamada ise tam metin incelemesi yapılarak peynir altı suyunun kullanım alanları, ekonomik potansiyeli ve yönetim modelleri üzerine odaklanan çalışmalar değerlendirmeye dahil edilmiştir. Seçilen literatür; peynir altı suyunun kullanım alanları ve değerlendirme yaklaşımları doğrultusunda gıda sanayii, tarımsal üretim, enerji üretimi, biyoteknoloji uygulamaları ve endüstriyel yönetim modelleri başlıkları altında sınıflandırılmıştır. Bu çalışmaların bulguları karşılaştırmalı bir yaklaşımla analiz edilerek dünya genelindeki uygulamalar ile Türkiye’deki mevcut durum; kurumsal yapı, teknolojik altyapı, ürün çeşitliliği ve mevzuat açısından değerlendirilmiştir. Buna ek olarak Türkiye’deki peynir üretimi ve buna bağlı olarak ortaya çıkan peynir altı suyu potansiyelinin belirlenmesi amacıyla TÜİK, Ulusal Süt Konseyi (USK) ve FAO gibi resmi veri kaynaklarından elde edilen istatistiksel veriler kullanılmıştır. Türkiye’deki peynir üretimi ile tahmini peynir altı suyu miktarı arasındaki ilişki ise literatürde yaygın olarak kabul edilen 1 birim peynir üretimine karşılık yaklaşık 8–9 birim peynir altı suyu oluştuğu varsayımı temel alınarak hesaplanmıştır.

2. Peynir Altı Suyunun Değerlendirilmesi

2.1. Gıda Sanayiinde Kullanımı ve Değerlendirme Potansiyeli

Gıda sanayiinde yüksek kaliteli protein, laktoz ve mineral içeriğiyle stratejik bir hammaddeye dönüşen Peynir Altı Suyu (PAS), çok geniş bir yelpazede fonksiyonel çözümler sunmaktadır. Fırıncılık mamullerinde doku ve lezzeti iyileştirmekle kalmayıp, Maillard reaksiyonu aracılığıyla ideal kabuk renginin oluşmasını sağlayan PAS (Papademas and Kotsaki, 2019); süt

ürünlerinde ise dondurma üretiminde yağsız süt tozuna alternatif teşkil etmekte ve yoğurtlarda pürüzsüz bir kıvam elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Şekerleme sektöründe özellikle karamel tipi ürünlerde arzu edilen taneli yapıyı oluştururken, dondurulmuş tatlılarda etkili bir yağ ikame maddesi olarak görev yapar (Kosikowski, 1979; Schaefer et al., 2023). Besleyici ve özel gıda üretimi kapsamında; PAS protein konsantreleri (WPC) ve izolatları (WPI), anne sütüne yakın profil sağlayan bebek mamalarında, kas onarımı odaklı sporcu gıdalarında ve klinik beslenme ürünlerinde temel bileşen niteliğindedir. İçecek sanayiinde meyve suları ile harmanlanan besleyici içeceklerin üretiminde, et sanayiinde ise sosis ve jambon gibi işlenmiş ürünlerde su tutma kapasitesini artıran bağlayıcı bir dolgu maddesi olarak değerlendirilmektedir. Türkiye’de gıda sanayiinde peynir altı suyunun kullanımı belirli alanlarla sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte, fonksiyonel gıdalara yönelik talebin artması ve sağlıklı beslenme eğilimlerinin güçlenmesi, bu yan ürünün gıda sanayiindeki önemini giderek artırmaktadır. Bu durum, bilgi üretimi ile uygulama arasındaki yapısal kopukluğa işaret etmektedir (Sirmacekic, 2022).

2.2. Bitkisel ve Hayvansal Üretim Faaliyetlerinde Kullanımı

Peynir altı suyu, modern tarımsal üretim süreçlerinde hem hayvansal besleme hem de bitkisel verimlilik odağında değerli bir girdi olarak konumlanmaktadır. Hayvansal üretim disipliniinde sıvı, konsantre veya toz formunda değerlendirilen bu yan ürün; sığır, kanatlı ve domuz yetiştiriciliğinde maliyet etkin bir rasyon bileşenidir. Özellikle tavukçulukta muhteviyatındaki laktoz, belirli patojenlerin baskılanmasında kritik rol üstlenirken; barındırdığı zengin riboflavin civciv gelişimini hızlandırmakta ve kuluçka başarısını artırmaktadır (Webb and Whittier, 1948). Domuz yetiştiriciliğinde ise yüksek enerji muhtevasıyla özellikle yavru besleme aşamasına optimal uyum sağlayan PAS, protein konsantreleri aracılığıyla süt ikame ürünlerinin ana eksenini oluşturmaktadır. Bu bileşenler bağırsak mikrobiyotasını düzenleyici biyolojik açıdan etkili bir bileşen olarak da görülmekte ve işletme bazında yem giderlerinde önemli oranda tasarruf imkânı sağlamaktadır (Kosikowski, 1979). Bitkisel üretim perspektifinde ise PAS hem doğal bir koruyucu hem de toprak kondisyonier olarak işlev görmektedir. Ot silajı uygulamalarında laktik asit içeriğiyle besin kaybını önleyen bu sıvı, aynı zamanda mera ve tarım arazilerinin ıslahında doğrudan toprak uygulaması yöntemiyle sisteme dahil edilebilmektedir. Ancak bu yöntemin, toprakta oksijen tüketimini ekstrem seviyelere çıkararak ürün kayıplarına sebebiyet vermemesi için titizlikle yönetilmesi gerekmektedir (Papademas and Kotsaki, 2019). Modern döngüsel ekonomi yaklaşımlarında ise PAS, biyogaz tesislerinde enerji eldesinde kullanıldıktan sonra geriye kalan fermente atık formuyla toprağa geri kazandırılmakta; böylece çevresel riskler bertaraf edilerek sürdürülebilir bir ekosistem inşa edilmektedir. Bu kullanım alanları, peynir altı suyunun yalnızca bir atık değil, gıda, tarım ve enerji sektörlerinde değerlendirilebilecek çok yönlü bir biyolojik kaynak olduğunu göstermektedir.

3. Peynir Altı Suyunun Değerlendirilmesine İlişkin Literatürün İncelenmesi

Peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik literatür, bu yan ürünün çevresel risklerinden ekonomik ve endüstriyel potansiyeline uzanan çok boyutlu bir çerçevede gelişmiştir. İlk dönem çalışmalarda peynir altı suyu daha çok yüksek biyolojik oksijen ihtiyacı ve kimyasal oksijen

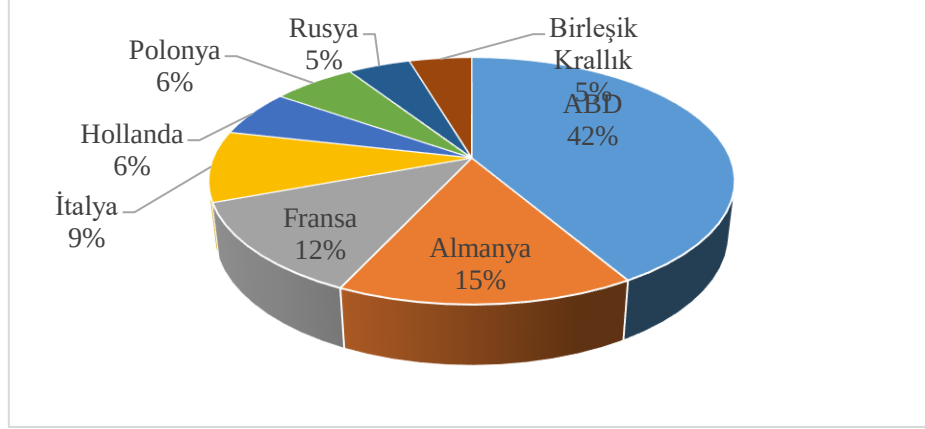
ihtiyacı nedeniyle bertaraf edilmesi gereken bir atık olarak ele alınırken, sonraki araştırmalarda gıda, tarım, hayvancılık ve enerji üretimi gibi alanlarda değerlendirilebilen katma değerli bir yan ürün olduğu ortaya konulmuştur. Bu doğrultuda literatürde, peynir altı suyunun değerlendirilmesine ilişkin yaklaşımlar teknik altyapı, organizasyonel yapı, politika desteği ve çevresel sürdürülebilirlik boyutlarıyla incelenmektedir. (Aydın ve Eker, 2019; Yıldırım ve Çetin, 2020; Şen ve Göktaş, 2022).

3.1. Dünya’da Peynir Altı Suyunun Değerlendirilmesi

Dünya genelinde süt sanayii, peynir altı suyunu (PAS) çevresel bir yükümlülüğten ziyade, yüksek katma değerli bir ekonomik varlık ve stratejik bir hammadde olarak konumlandırmıştır. Özellikle Avrupa Birliği ülkeleri ve ABD’de PAS yönetimi; teknolojik altyapı, yasal düzenlemeler ve güçlü organizasyonel modellerle desteklenen güçlü bir endüstri haline gelmiştir. Küresel ölçekte geliştirilen değerlendirme modelleri incelendiğinde, bu sürecin en başarılı kurumsal stratejisi olarak "Lider Firma" (Lead Firm) modeli öne çıkmaktadır. Bu modelin merkezinde yer alan Danimarka merkezli Arla Foods, PAS işleme faaliyetlerini Arla Foods Ingredients (AFI) adlı uzmanlaşmış ve bağımsız bir birim aracılığıyla yürüterek değer zincirini profesyonel bir organizasyon yapısına kavuşturmuştur (Bolwig et al., 2019)

Söz konusu modelde lider firma; hammadde sağlayan diğer mandıralarla "esir tedarikçi" (captive supplier) ilişkisi kurarak pazar bilgisi ve fiyatlandırma üzerinde tam kontrol sağlarken, yüksek düzeyli Ar-Ge yatırımlarıyla PAS’ı basit bir yan ürün olmaktan çıkarıp bebek mamaları, sporcu gıdaları ve tıbbi beslenme ürünleri için fonksiyonel bileşenlere dönüştürmektedir. Özellikle asit peynir altı suyunun patentli teknolojilerle yeniden işlenebilir hale getirilmesi, bu modelin teknik kapasitesini ve stratejik yatırımlarla sağlanan ölçek ekonomisi avantajını kanıtlamaktadır. Benzer şekilde ABD ve Fransa gibi ülkelerde de küçük ve orta ölçekli üreticilerden çıkan PAS’ın merkezi tesislerde toplanmasına dayanan sistemler uygulanmaktadır (Zall, 1984). Bu yapıda kamu politikaları; yatırım teşvikleri ve fiyat destek mekanizmaları aracılığıyla süreci desteklemekte, membran ayırma teknikleri (ultrafiltrasyon, ters ozmoz) sayesinde PAS; protein konsantreleri (WPC), izolatlar (WPI) ve laktoz türevleri gibi farklı fraksiyonlara ayrıştırılmaktadır. Ayrıca laktoz içeren fazın anaerobik fermantasyon yoluyla biyogaz veya etanole dönüştürülmesi, özellikle Avrupa ve Okyanusya’daki bazı ülkelerde hem enerji geri kazanımı hem de atık yönetimi açısından endüstriyel ölçekte karşılık bulmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde ise süreç daha karmaşık bir görünüm sergilemektedir; örneğin Brezilya’da düzenleyici çerçeve kullanımı teşvik etse de PAS bazlı ürünlerin süt yerine ikame edilmesi gibi besinsel tartışmalar devam etmektedir. Sonuç olarak küresel ölçekte PAS yönetimi, yalnızca bir arıtma meselesi olmaktan çıkmış; teknik kapasitenin, küresel pazarlama ağının ve döngüsel ekonomi stratejilerinin birleştiği bütüncül bir ekonomik yapıya dönüşmüştür.

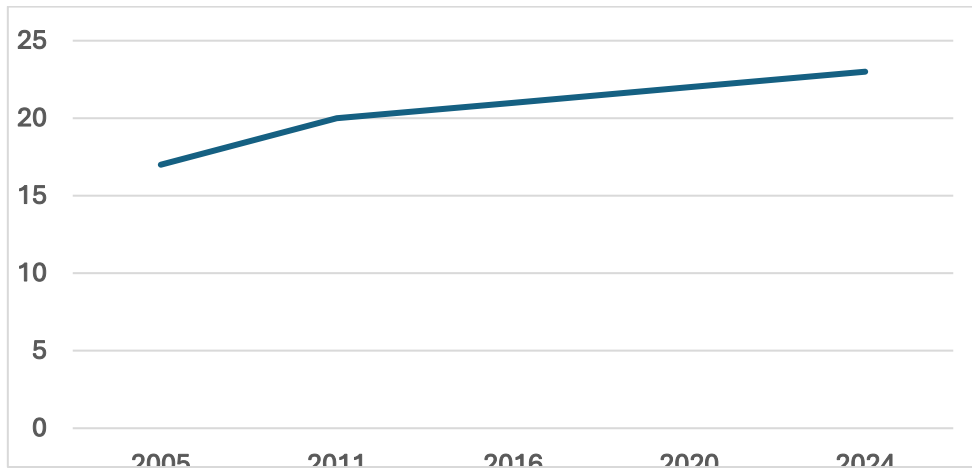
Dünya genelinde peynir üretimi, 2016-2024 yılları arasında istikrarlı bir artış göstererek 2024 yılı itibarıyla 22 milyon tonun üzerinde bir hacme ulaşmıştır. (Görsel 1) veriler analiz edildiğinde; özellikle Avrupa Birliği ve ABD’nin küresel üretimin önemli bir bölümünü oluşturduğu görülmektedir.



Kaynak: FAO (2010-2022)

Görsel 1. Dünya Peynir Altı Suyu Tahmini (%)

Peynir üretimindeki bu büyüme, her 1 kg peynire karşılık açığa çıkan yaklaşık 9 kg'lık yan ürün göz önüne alındığında (Papademas and Kotsaki, 2019), yıllık bazda yaklaşık 200 milyon tonluk büyük bir peynir altı suyu (PAS) arzı yaratmaktadır. Dünya genelinde süt ürünleri piyasasında peynir üretimi ve peynir altı suyu (PAS) türevleri, birbirini besleyen güçlü bir ekonomik ekosistem oluşturmaktadır. Görsel 2 incelendiğinde, 2024 yılı itibarıyla 22 milyon tonu aşan küresel peynir üretiminin beraberinde yıllık yaklaşık 200 milyon tonluk sıvı peynir altı suyu potansiyeli yarattığı görülmektedir. Görsel, dünya genelinde peynir altı suyu üretim potansiyelinin coğrafi dağılımını ve endüstriyel hammadde kapasitesini ortaya koymaktadır. Grafikte açıkça görüldüğü üzere ABD, %38'lik payı ile küresel üretim havuzunun başlıca üretim alanı konumunda yer alarak, bu yan ürünün katma değerli türevlere (WPC, WPI, laktoz) dönüştürülmesinde önemli bir ölçek ekonomisi avantajına sahiptir.



Kaynak: FAO (2005-2024)

Görsel 2. Küresel Ölçekte Peynir Üretimi ve PAS Potansiyeli

Avrupa bloğu ise parçalı bir yapı sergilemesine rağmen, özellikle Almanya (%14,1) ve Fransa (%11,3) liderliğinde, İtalya (%8,4), Hollanda (%5,6) ve Polonya (%5,6) gibi aktörlerle birleştiğinde küresel arzın yarısından fazlasını kontrol eden önemli bir üretim ve işleme alanı oluşturmaktadır. Listenin devamında yer alan Rusya ve Birleşik Krallık (%4,2), bu hiyerarşide tamamlayıcı bir rol oynamaktadır. (FAO 2005-2024). Sonuç olarak bu dağılım, peynir altı suyunun atık yönetiminden ziyade yüksek proteinli içerik ve gıda teknolojileri endüstrisine hammadde sağlayan stratejik bir ekonomik değer zinciri olduğunu ve bu zincirin büyük oranda Kuzey Amerika ile Batı Avrupa ekseninde kümелendiğini göstermektedir. (Bolwig et al., 2019)

3.1.1. Küresel Peynir Altı Suyu (PAS) Yönetim Modelleri

Son yıllarda döngüsel ekonomi yaklaşımının yaygınlaşmasıyla birlikte peynir altı suyuna yönelik bakış açısı önemli ölçüde değişmiştir. Daha önce bertaraf edilmesi gereken bir yan ürün olarak değerlendirilen bu akış, günümüzde yüksek katma değerli bileşenlerin üretilebildiği potansiyel bir endüstriyel kaynak olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda uygulanan ilk model olan Kooperatif Modeli, üretici birliklerinin süt toplama ve peynir üretimini organize ederek, açığa çıkan yan ürünü kooperatife bağlı merkezi işleme ünitelerinde WPC, laktoz veya toz ürünlere dönüştürdüğü bir yapıdır. Özellikle ABD, Danimarka ve Hollanda'da başarıyla uygulanan bu modelde, örneğin ABD'deki süt kooperatifleri 198 süt işleme tesisini yönetmekte ve kurutulmuş whey ürünlerinin yaklaşık %40'ını pazarlamaktadır. (Schaefer et al., 2023)) İkinci bir yaklaşım olan Merkezi (OSB / Endüstriyel Kümelenme) Modeli, OSB altyapılarının sadece "bertaraf" odaklı değil, Ar-Ge ve sanayi entegrasyonu ile "kaynak yönetimi" odaklı yeniden yapılandırılmasını esas alır. İtalya ve Hollanda'da bölgesel kümelenme ve ortak altyapı kullanımı ön plandayken, Çin'de devlet destekli sanayi parkları aracılığıyla yüksek teknolojili ve merkezi bir sistem uygulanmaktadır. Son olarak, Türkiye ve Brezilya gibi ülkelerde yaygın olan Sözleşmeli (Endüstriyel) Toplama Modeli, PAS'ın kantarla ölçülerek kilogram bazlı ödeme ile toplandığı ve atığı stratejik bir ticari emtiaya dönüştüren merkezi bir lojistik yönetim sistemidir. Mevcut durumda Türkiye'deki yapı büyük ölçüde özel sektör ile süt işletmeleri arasında kurulan bu sözleşmeli tedarik yapısına dayanmaktadır. (Yıldırım ve Çetin, 2020).

3.1.2. Dünyadaki Mevcut Destekleme ve Mevzuatlar

Dünya genelinde peynir altı suyu (PAS) yönetimi, çevresel bir atığın stratejik bir endüstriyel hammaddeye dönüştürülmesini hedefleyen "oluktan altına" (*gutter-to-gold*) felsefesiyle şekillenmektedir. Bu dönüşümün yasal öncüsü olan Avrupa Birliği, 1999/31/EC sayılı Atık Depolama Direktifi ile PAS'ın atık sahalarına dökülmesini kesin olarak yasaklayarak sektörü geri kazanıma zorunlu kılmıştır (Papademas and Kotsaki, 2019). Peynir altı suyunun biyolojik oksijen ihtiyacının (BOİ) kentsel atık sulara oranla yaklaşık 175 kat daha fazla olması, bu maddenin arıtılmadan su kaynaklarına deşarj edilmesini sucul ekosistem için ciddi bir ötrofikasyon riski haline getirmekte; bu nedenle kontrolsüz deşarjlar sıkı çevre yasalarıyla engellenmektedir. Söz konusu yasal baskılar, sadece cezai yaptırımlarla sınırlı kalmayıp Ortak Tarım Politikası (CAP) ve çeşitli kırsal kalkınma fonları aracılığıyla inovasyon projelerine sunulan doğrudan finansal teşviklerle desteklenmektedir. Ayrıca, PAS'ın biyogaza dönüştürülmesine yönelik enerji geri kazanım projeleri de döngüsel ekonomi bağlamında özel devlet desteklerine konu olmaktadır (Bolwig et al., 2019). Benzer şekilde ABD ve Fransa gibi

gelişmiş pazarlarda uygulanan kamu politikaları, PAS'ı gıda sanayii için ekonomik değeri yüksek stratejik bir bileşen olarak konumlandırmaktadır. Bu ülkelerde süreç; yatırım teşvikleri ve fiyat destek mekanizmaları üzerinden ölçek ekonomisinin sağlanmasına yönelik makro politikalarla yürütülmektedir (Zall, 1984). Çevresel düzenlemelerin ham peynir altı suyunun doğrudan bertarafını imkansız kılması, işletmeleri ultrafiltrasyon (UF) ve ters ozmoz (RO) gibi membran ayırma tekniklerine ve merkezi işleme modellerine yönlendirmiştir (Kosikowski, 1979; Bolwig et al., 2019). Gelişmekte olan pazarlar arasında yer alan Brezilya ise 2014 yılından itibaren başlattığı özel teknolojik teşvik programları ve 9013/2017 sayılı Kararname ile hayvansal menşeli ürünlerin denetimi kapsamında süreci sıkı bir regülasyon altına almıştır (Schaefer et al., 2023). Bu yasal çerçeve, PAS'ın ürün bileşimindeki kullanımını hem sıhhi hem de endüstriyel açıdan denetleyerek pazar güvenliğini sağlamaktadır.

Küresel eğilimler bir bütün olarak incelendiğinde, PAS'ın kontrolsüz deşarjının yarattığı kirlilik yükü nedeniyle zorunlu arıtma uygulamalarının ve ağır cezai yaptırımların dünya genelinde standartlaştığı görülmektedir (Papademas and Kotsaki, 2019). Gelişmiş pazarlarda bu yan ürünün gıda zincirindeki yerini sağlamlaştırmak adına oluşturulan "makul kimlik standartları" ve şeffaf pazarlama sistemleri hem tüketicinin korunmasını hem de sektörün yasal güvencesini tesis etmiştir (Kosikowski, 1979). Sonuç olarak küresel sistem; çevre mevzuatıyla bertarafı maliyetli hale getirirken, diğer yandan IPARD ve CAP gibi stratejik finansman araçlarıyla yüksek katma değerli üretimi finanse ederek PAS'ı sürdürülebilir bir ekonomik değer zincirine dönüştürmektedir.

3.2. Türkiye’de Peynir Altı Suyunun Değerlendirilmesine İlişkin Mevcut Durum

Türkiye süt ve süt ürünleri sanayinde peynir üretimi stratejik bir paya sahip olmasına rağmen, peynir altı suyunun (PAS) değerlendirilmesine yönelik uygulamalar henüz sistematik bir yapıya kavuşmamıştır. Ancak bu yapısal boşluğun içinde, yerel ölçekte geliştirilen stratejik çözümler umut verici birer istisna oluşturmaktadır. Ezine bölgesinde hayata geçirilen iş birliği modeli, PAS yönetimi için dikkat çekici bir iyi uygulama örneği sunmaktadır. Saha görüşmeleri ve işletme verilerine göre; bölgedeki fabrikalarda depolanan PAS, tankerler aracılığıyla merkezi bir tesise transfer edilmekte ve "kilogram bazlı sözleşmeli ödeme" yöntemiyle satın alınarak ticari bir emtiaya dönüştürülmektedir (Ezine Kaymakamlığı, 2023).

Benzer bir model, Türkiye’nin önemli süt havzalarından biri olan Gönen (Balıkesir) bölgesinde de gözlemlenmektedir. Gönen merkezli büyük ölçekli süt işleme tesisleri, çevre bölgelerdeki mandıralardan topladıkları PAS'ı "sözleşmeli tedarik" yöntemiyle kendi bünyelerindeki ileri işleme tesislerine aktarmaktadır. Burada kurulan toz kurutma ve ultrafiltrasyon üniteleri sayesinde sıvı PAS; protein konsantrelerine (WPC) dönüştürülerek yüksek katma değerli bir endüstriyel hammadde haline getirilmektedir. Bu bölgesel modellere ek olarak Konya havzası, merkezi işleme kapasitesi ve ihracat potansiyeli açısından kritik bir örnek teşkil etmektedir. Bölgedeki yüksek üretim kapasitesine sahip tesisler (örneğin Enka Süt), çevre illerdeki küçük ve orta ölçekli mandıralardan PAS toplayarak bunları toz haline getirmekte ve küresel pazarlara ihraç etmektedir (Konya Sanayi Odası, 2022). Konya örneği, PAS'ın sadece bertaraf edilen bir atık değil, döviz getirisi sağlayan stratejik bir ihracat kalemi haline dönüştürülebileceğini gösteren endüstriyel bir örnek uygulamadır. Ancak bu başarılı yerel örneklerle rağmen, süt ve

süt ürünlerine yönelik İhtisas Organize Sanayi Bölgelerinin (İhtisas OSB) sınırlı olması ve mevcut altyapıların geri kazanımdan ziyade yalnızca atık su deşarj parametrelerine odaklanması, PAS'ın genel atık akışına karışarak değerini yitirmesine yol açmaktadır. Ayrıca, süt toplama merkezlerine benzer bir yapının PAS için tesis edilmemiş olması, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin teknik yetersizlikler ve lojistik maliyetler nedeniyle sürece dahil olmasını zorlaştırmaktadır. Literatürde peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik en önemli yapısal eksikliklerden biri, merkezi ve organize bir toplama sisteminin bulunmaması olarak öne çıkmaktadır. Süt toplama merkezlerine benzer şekilde bölgesel ölçekte çalışan bir peynir altı suyu toplama ve yönlendirme yapısının olmaması, özellikle dağıtık üretim yapısına sahip bölgelerde lojistik maliyetleri artırmakta ve küçük işletmelerin sürece katılımını zorlaştırmaktadır (Aydın ve Eker, 2019). Bu nedenle değerlendirme sorunu yalnızca teknik altyapı meselesi değil, aynı zamanda organizasyonel koordinasyon sorunu olarak da ele alınmalıdır. Bunun yanı sıra, üreticilerin peynir altı suyunu çoğu zaman ekonomik değeri olan bir girdi yerine bertaraf edilmesi gereken bir yan ürün olarak algılaması da değerlendirme eğilimlerini sınırlayan önemli bir unsurdur. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde alternatif kullanım alanlarına ilişkin bilgi düzeyinin sınırlı olması, yenilikçi değerlendirme yöntemlerinin yaygınlaşmasını zorlaştırmaktadır (Yıldırım ve Çetin, 2020). Bu durum, teknik ve ekonomik kısıtların yanı sıra farkındalık ve örgütlenme eksikliğinin de sürecin önünde belirleyici bir engel olduğunu göstermektedir. Son yıllarda PAS'ın kullanımına yönelik akademik çalışmalar artsa da bulgular büyük ölçekli teorik düzeyde kalmakta ve sahaya yeterince yansıtılamamaktadır. (Yıldırım ve Çetin, 2020; Şen ve Göktaş, 2022).

Türkiye'de peynir üretimindeki artış, peynir altı suyu (PAS) miktarında da önemli bir artışı beraberinde getirmektedir. 2023 yılı itibarıyla yaklaşık 716 bin ton peynir üretimine karşılık 6,4 milyon tonun üzerinde PAS potansiyeli olduğu tahmin edilmektedir. Bu durum, PAS'ın yalnızca çevresel bir atık olarak değil, aynı zamanda önemli bir endüstriyel hammadde olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak mevcut kurumsal ve teknolojik altyapı yetersizlikleri nedeniyle Türkiye'de ortaya çıkan bu potansiyelin önemli bir bölümü yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülememekte, büyük ölçüde düşük katma değerli kullanım alanlarında veya bertaraf süreçlerinde değerlendirilmektedir. Uluslararası uygulamalar incelendiğinde, özellikle Avrupa Birliği ve ABD'de peynir altı suyunun membran teknolojileri ve ileri işleme yöntemleri aracılığıyla protein konsantreleri, laktoz türevleri ve fonksiyonel gıda bileşenleri gibi yüksek katma değerli ürünlere dönüştürüldüğü görülmektedir. Buna karşın Türkiye'de üretim yapısının parçalı olması, merkezi toplama sistemlerinin sınırlılığı ve küçük ölçekli işletmelerin teknik altyapı eksiklikleri, PAS'ın ekonomik potansiyelinin tam anlamıyla değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum, Türkiye'de peynir altı suyu yönetiminin yalnızca teknik değil aynı zamanda organizasyonel ve kurumsal bir dönüşüm gerektirdiğini göstermektedir.

Çizelge 1'de sunulan veriler incelendiğinde; 2005-2009 döneminde yıllık ortalama 148.298 ton olan peynir üretiminin, 2023 yılı itibarıyla 716.485 tona ulaştığı görülmektedir. (Gülaç, 2015) Peynir üretimindeki bu ivme, proteince zengin bir yan ürün olan peynir altı suyunun (PAS) miktarında da benzer bir artışı beraberinde getirmiştir. Literatürde kabul gören "her bir birim peynir için 8-9 birim PAS oluşumu (Papademas and Kotsaki, 2019) hesaplamasına dayanarak;

2005-2009 ortalamasında 1,3 milyon ton civarında olan tahmini PAS miktarının, 2023 yılında 6,4 milyon tonu aştığı öngörülmektedir. (USK, 2013; USK, 2015) Ham madde potansiyelindeki bu büyük artışa rağmen, bu kaynağın ne kadarının ekonomiye kazandırıldığına dair doğrudan veriler hala kısıtlıdır. (Örmeci Kart ve Demircan, 2014) Türkiye genelinde üretim; sayıları 1,3 milyonu aşan küçük aile işletmelerinden modern bütünleşmiş tesislere kadar geniş bir yelpazede yapılmaktadır.

Geçmişte bertaraf edilmesi gereken bir "atık" olarak görülen PAS, yüksek besin bileşenleri sayesinde gıda sanayii için artık stratejik bir girdi olarak kabul edilmektedir (Demirci ve Arıcı, 1989).

Çizelge 1. Türkiye’de Çiğ Süt, Peynir Üretimi ve Tahmini Peynir Altı Suyu Miktarları (2005–2022)

Yıllar	Çiğ Süt Üretimi	Peynir Üretimi	PAS Potansiyeli
2005*	11.107.897	-	-
2006*	~12.000.000	-	-
2007*	~12.200.000	-	-
2008*	~12.200.000	-	-
2009*	12.542.186	-	-
2010*	13.543.674	437.000	3.933.000
2011*	15.056.211	519.000	4.671.000
2012*	17.401.262	564.000	5.076.000
2013**	18.223.712	600.000	5.400.000
2014**	18.630.860	633.000	5.697.000
2015**	18.654.682	666.000	5.994.000
2016**	18.489.161	661.000	5.949.000
2017**	20.699.894	662.319	5.960.871
2018***	20.803.729	751.214	6.760.926
2019***	21.541.158	711.236	6.401.124
2020***	22.278.584	741.348	6.672.132
2021***	23.016.013	738.744	6.648.696
2022***	23.753.441	715.352	6.438.168

Kaynak: TÜİK* (2005-2013), Ulusal Süt Konseyi** (2013-2018) FAO***(2018-2022)

Not: Peynir altı suyu miktarı, peynir üretim miktarının yaklaşık 9 katı alınarak hesaplanmıştır (Papademas and Kotsaki, 2019)

Türkiye hayvancılık ekonomisinde peynir altı suyunun (PAS) atıktan katma değerli bir endüstriyel hammaddeye dönüşüm süreci; uluslararası fonlar, ulusal destek programları ve yerel kalkınma dinamikleriyle şekillenmektedir. Sektörel yatırımların en büyük finansal dayanağını, Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti eş finansmanı ile yürütülen IPARD III Programı oluşturmaktadır. Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu (TKDK) IPARD III Uygulama Rehberi uyarınca yönetilen bu fonun "103 nolu Tedbiri" PAS işleme tesislerinin kurulumu ve modernizasyonu için yatırımcıya %50 ile %70 bandında geri ödemesiz hibe

sunarak teknolojik dönüşümü finanse etmektedir. (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018) Birçok modern PAS işleme tesisi, günümüzde AB standartlarındaki bu fonlar aracılığıyla teknolojik altyapısını kurmaktadır. Buna paralel olarak, yerel üretim kapasitesini artırmayı hedefleyen T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, (KKYDP 2026/1 nolu Tebliğ) PAS'tan protein tozu, laktoz ve permeat gibi spesifik bileşenlerin ayrıştırılmasına yönelik projelere %50 oranında hibe sağlamaktadır. Yatırımın finansal sürdürülebilirliği noktasında ise(T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2012/3305 Kanun) KDV istisnası, gümrük vergisi muafiyeti ve vergi indirimi gibi mekanizmalarla yatırımın geri dönüş süresini (ROI) kısaltmaktadır. Yüksek hibe oranlarına rağmen PAS geri kazanımının hala istenilen seviyeye ulaşamadığı görülmüştür. Mevcut yapı, PAS yönetimini bütüncül bir kamusal strateji olmaktan çıkarıp, büyük ölçüde kapasitesi yüksek sınırlı sayıdaki özel sektör işletmesinin inisiyatifine bırakmaktadır. Özellikle İhtisas Organize Sanayi Bölgelerinde (OSB) ortak atık yönetim sistemlerinin ve aktif geri kazanım altyapılarının kurulmamış olması, KOBİ ölçeğindeki işletmeleri bertaraf noktasında çözümsüz bırakmaktadır.

3.3. Dünya ve Türkiye Karşılaştırmalı Değerlendirme

Türkiye ve uluslararası uygulamalar karşılaştırıldığında, peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik yaklaşımların teknik kapasite, organizasyon yapısı, politika desteği ve sektörel farkındalık bakımından belirgin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Uluslararası uygulamalarda peynir altı suyu (PAS), yalnızca bir atık yönetimi meselesi olmaktan çıkarılarak gıda, biyoteknoloji ve enerji sektörlerini besleyen stratejik bir kaynak olarak konumlandırılmıştır. Sütün toplam besin değerinin yaklaşık %55'ini barındıran bu kaynak, döngüsel ekonomi prensipleriyle küresel ölçekte ekonomiye kazandırılmaktadır. (Demirci ve Arıcı, 1989) Ancak Türkiye'de üreticiler, yüksek yatırım maliyetleri ve teknik altyapı eksiklikleri nedeniyle yıllık 6,4 milyon tonu aşan bu potansiyeli hâlâ bertaraf edilmesi gereken bir çevresel yük olarak algılamaktadır (Yıldırım ve Çetin, 2020). Bu algısal ve yapısal bariyer, PAS'ın ekonomik bir değere dönüşmesini engellediği gibi, şehir kanalizasyonundan 175 kat daha fazla kirlilik yüküne (BOİ) sahip olan bu sının su ve toprak kaynakları üzerinde baskı oluşturmaya neden olmaktadır (Şen ve Göktaş, 2022). Özellikle Organize Sanayi Bölgelerinin (OSB) altyapısının geri kazanımdan ziyade "bertaraf" odaklı tasarlanmış olması, çevresel riskleri kalıcı hale getiren temel bir unsurdur. Kurumsal açıdan bakıldığında; AB ve ABD'de PAS yönetimi kooperatifler, ortak kullanım tesisleri ve Danimarka merkezli Arla Foods Ingredients (AFI) örneğinde olduğu gibi PAS'ı tıbbi beslenme ve sporcu gıdaları gibi yüksek katma değerli alanlara kanalize eden "Lider Firma" yapıları üzerine kurgulanmıştır. Türkiye'de ise bu tür kolektif modellerin sınırlılığı, özellikle küçük işletmelerin ölçek ekonomisinden faydalanmasını zorlaştırmakta ve süreci kantar bazlı basit bir "sözleşmeli tedarik" yapısına sınırlamaktadır. Bu durum, teknoloji transferinde de kopukluklara yol açmakta; dünyada membran ayırma teknikleri (ultrafiltrasyon, ters ozmoz) standart hale gelmişken, Türkiye'de akademik birikimin sahaya yansıyamaması nedeniyle PAS'ın lor peyniri veya hayvan yemi gibi düşük katma değerli alanlarda kalmasına neden olmaktadır. (Aydın ve Eker, 2019). Ayrıca PAS'ın değerlendirilme stratejileri, sadece ekonomik kâr değil, halk sağlığı perspektifiyle de yönetilmelidir; nitekim PAS bazlı ürünlerin süt yerine ikame edilmesi literatürde besinsel dengesizlik riski olarak tartışılmaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'nin PAS yönetiminde "oluktan

altına" (gutter-to-gold) bir geçiş yapabilmesi; bölgesel toplama merkezlerinin kurulmasına, İhtisas OSB'lerin kaynak odaklı yeniden yapılandırılmasına ve akademik bilginin sanayiye transferini sağlayacak pilot tesislerin hayata geçirilmesine bağlıdır. Sütün içinde saklı kalan bu %55'lik besin potansiyeli, ancak bütünleşik ve sürekli politikalarla gerçek bir ekonomik değere dönüştürülebilir.

Çizelge 2'de Türkiye ile uluslararası uygulamalar arasındaki temel farklılıklar stratejik bakış açısı, teknik altyapı, ürün portföyü ve mevzuat desteği açısından karşılaştırmalı olarak özetlenmektedir. Çizelge incelendiğinde, gelişmiş ülkelerde peynir altı suyunun döngüsel ekonomi çerçevesinde yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülen stratejik bir hammadde olarak ele alındığı, Türkiye'de ise teknik altyapı ve organizasyonel yapıdaki sınırlılıklar nedeniyle bu potansiyelin henüz tam anlamıyla değerlendirilemediği görülmektedir.

Çizelge 2. Türkiye ve Dünya'da Peynir Altı Suyu (PAS) Değerlendirme Yaklaşımlarının Karşılaştırmalı ve Stratejik Analizi

Karşılaştırma Kriteri	Türkiye (Mevcut Sektörel Yapı)	Uluslararası Uygulamalar (AB & ABD)	Temel Akademik Kaynaklar
Stratejik Bakış ve Atık Yönetimi	PAS, yeni yönetmeliklerle bertarafı zorunlu bir atık olmaktan çıkarılarak geri kazanımı yasal çerçevede teşvik edilen stratejik bir hammadde olarak tanımlanmaktadır.	Döngüsel ekonomi prensibiyle, gıda ve ilaç sanayii için ekonomik değeri yüksek stratejik bir hammadde olarak yönetilmektedir.	(Bolwig et al., 2019); Papademas and Kotsaki (2019); ÇŞİDB (2026)
Organizasyonel ve Teknik Altyapı	Merkezi bir toplama sistemi eksiktir; lojistik süreçler parçalıdır ve KOBİ düzeyindeki tesislerde membran teknolojileri (UF, RO) kullanımı sınırlıdır.	Kooperatif tabanlı toplama ağları ve uzmanlaşmış büyük ölçekli işleme merkezlerinde ileri teknoloji kullanımı standarttır.	Kosikowski (1979); Zall (1984); TKDK (2024)
Ürün Portföyü ve Katma Değer	Geleneksel lor üretimi ve sıvı yem rasyonlarının ötesine geçilerek; Yatırım Teşvik Belgeleri (2012) desteğiyle WPC, laktoz ve PAS tozu üretimine yönelik endüstriyel kapasite inşa edilmektedir.	WPC, WPI, laktoz türevleri, farmasötik ürünler ve spesifik tıbbi beslenme bileşenleri gibi geniş bir yelpazede yüksek değerli çıktılar elde edilmektedir.	Webb ve Whittier (1948); Sanayi ve Teknoloji Bak. (2012)(Bolwig et al., 2019)
Mevzuat ve Teşvik Mekanizmaları	IPARD III ile %70'e varan hibeler ve Yeşil Sanayi Destek Programı kredileri mevcuttur. Deşarj kriterleri ile denetimler sıklaştırmıştır.	AB 1999/31/EC gibi direktiflerle geri kazanım zorunlu kılınmış, markalama ve denetim mekanizmaları kurumsallaştırmıştır.	Papademas and Kotsaki (2019); (Schaefer et al., 2023); Tarım ve Orman Bak. (2026)

Genel olarak değerlendirildiğinde, uluslararası uygulamalar peynir altı suyunun etkin biçimde değerlendirilmesinde yalnızca teknik kapasitenin değil, aynı zamanda örgütlenme yapısının, politika sürekliliğinin ve yönlendirici teşvik mekanizmalarının da belirleyici olduğunu göstermektedir. Türkiye'de ise mevcut yüksek üretim potansiyeline rağmen bu alanlarda süregelen yapısal sınırlılıklar, peynir altı suyunun katma değerli ürünlere dönüştürülmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle Türkiye'de peynir altı suyunun daha etkin değerlendirilmesi,

teknik yatırımlar kadar kurumsal koordinasyonun ve uygulamaya dönük politika araçlarının güçlendirilmesine bağlıdır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik uluslararası uygulamalar ile Türkiye'deki mevcut yapı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde, dünya genelinde peynir altı suyu, artık bir bertaraf sorunu olmaktan çıkmış, döngüsel ekonomi prensipleriyle yönetilen stratejik bir hammaddeye dönüşmüştür (USK 2012). Küresel peynir üretiminin 23 milyon tona, buna bağlı PAS oluşumunun ise yıllık 205 milyon tona ulaştığı günümüzde; ABD (%38), Almanya (%14,1) ve Fransa (%11,3) gibi başlıca üretici ülkeler bu kaynağı gıda ve ilaç sanayinin merkezine yerleştirmiştir. AB ve ABD'de uygulanan kooperatif tabanlı toplama ağları ve uzmanlaşmış büyük ölçekli işleme merkezleri, en küçük işletmenin dahi üretimini sisteme dahil ederek PAS'ın ultrafiltrasyon (UF) ve ters ozmoz (RO) gibi ileri teknolojilerle işlenmesini sağlamaktadır. Bu sayede peynir altı suyu; protein izolatları (WPI), laktoz türevleri ve farmasötik ürünler gibi çok yüksek katma değerli bileşenlere dönüştürülerek ekonomiye yüksek oranda katkı sağlamaktadır. Mevcut literatür incelendiğinde, peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik çalışmaların büyük ölçüde teknik ve çevresel boyutlara odaklandığı; organizasyonel yapı, politika araçları ve sektör koordinasyonu gibi yönetsel boyutların ise daha sınırlı ele alındığı görülmektedir. Bu durum, peynir altı suyunun değerlendirilmesinde karşılaşılan sorunların yalnızca teknolojik kapasiteyle açıklanamayacağını; aynı zamanda kurumsal yapı, ölçek ekonomisi ve politika yönlendirmesi ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, peynir altı suyunun değerlendirilmesi yüksek bir potansiyel ile yapısal dönüşüm ihtiyacının kesiştiği noktadadır. 2023 yılı verilerine göre Türkiye'de üretilen 716 bin ton peynir, beraberinde 6,4 milyon tonu aşkın bir PAS potansiyeli getirmektedir. Ancak ülkemizde süreç, dünya örneklerinin aksine merkezi bir toplama sisteminden yoksun ve parçalı bir yapıdadır. Mevcut model büyük oranda özel sektör ile işletmeler arasındaki sözleşmeli tedarik yapısına dayanmakta, bu da özellikle KOBİ düzeyindeki tesislerde yüksek lojistik maliyetler ve teknik yetersizlikler nedeniyle değerli bir kaynağın ya geleneksel düşük katma değerli ürünlere (lor üretimi gibi) dönüşmesine ya da yüksek kirlilik yüküyle bertaraf edilmesine yol açmaktadır. Türkiye'de Organize Sanayi Bölgelerinin (OSB) mevcut altyapısının geri kazanımdan ziyade bertaraf odaklı olması, bu ekonomik kaybın temel nedenlerinden biri olarak saptanmıştır.

Bu veriler ışığında Türkiye'nin izlemesi gereken yol haritası; "atıktan kaynağa" paradigmasını merkeze alan bütüncül bir dönüşümü gerekli kılmaktadır. İlk adım olarak, bölgesel toplama merkezleri ve sektörel kümelenme modelleri hayata geçirilerek lojistik verimlilik artırılmalıdır. İhtisas OSB'lerin altyapısı, PAS'ı yüksek teknoloji ürünlerine dönüştürecek ortak kullanım tesislerini barındıracak şekilde yeniden yapılandırılmalıdır. Ayrıca, geleneksel yöntemlerin ötesine geçilerek protein izolatları ve tıbbi beslenme bileşenleri üretimi için Ar-Ge yatırımları ve stratejik teşvik mekanizmaları devreye alınmalıdır. Ulusal bir veri izleme sisteminin kurulması ve akademik bilginin pilot tesisler aracılığıyla sahaya transfer edilmesi, Türkiye'nin bu çevresel yükü küresel ölçekte rekabetçi bir ekonomik güce dönüştürmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, peynir altı suyunun etkin biçimde değerlendirilmesi yalnızca teknik bir işleme süreci değil, aynı zamanda organizasyonel yapı, sektör koordinasyonu ve politika araçlarıyla şekillenen bütüncül bir yönetim meselesidir. Türkiye’de mevcut üretim potansiyelinin ekonomik değere dönüşebilmesi, üretim yoğunluklarına dayalı bölgesel modellerin geliştirilmesi, sanayi–akademi iş birliklerinin güçlendirilmesi ve kaynak yönetimi odaklı politika araçlarının uygulanması ile mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Aydın, G., & Eker, S. (2019). Süt üretiminde yan ürünlerin değerlendirilmesi ve ekonomik katkısı. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 25(2), 45–56.
- Bolwig, S., Brekke, A., Strange, L., & Strøm-Andersen, N. (2019). Valorisation of whey: A tale of two Nordic dairies. In P. Schröder et al. (Eds.), *Circular economy and the transition to a sustainable bioeconomy*. Routledge.
- Demirci, M., & Arıcı, M. (1989). Peynir altı suyunun değerlendirilmesi ve kullanım alanları. *Gıda Dergisi*, 14(3), 145–152.
- Ezine Kaymakamlığı. (2023). Ezine Gıda İhtisas Organize Sanayi Bölgesi çalışmaları, *Ezine bölgesinde peynir altı suyu yönetimi ve iş birliği modeli hakkında açıklama*. Retrieved March 7, 2026, from <https://www.ezine.gov.tr/ezine-gida-ihisas-organize-sanayi-bolgesinde-calismalar-hizla-ilerliyor>
- FAO. (2024). *Agricultural production statistics 2010–2023* (FAOSTAT Analytical Briefs No. 96). Rome.
- Gülaç, Z. N. (2015). *Süt ve süt ürünleri 2015: Durum ve tahmin* (TEPGE Yayın No: 256). Ankara: Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü.
- Konar, A. (1978). Yeni gelişmelerin ışığında sütçülük artıklarının değerlendirilmesi ve ekonomik önemi. *Gıda*, 3(1), 35–46.
- Konya Sanayi Odası. (2022). *Konya havzası PAS işleme kapasitesi ve ihracat potansiyeli raporu*. Konya.
- Kosikowski, F. V. (1979). Whey utilization and whey products. *Journal of Dairy Science*, 62(7), 1149–1160.
- Örmeci Kart, M. Ç., & Demircan, V. (2014). Dünyada ve Türkiye’de süt ve süt ürünleri üretimi, tüketimi ve ticaretindeki gelişmeler. *Akademik Gıda*, 12(1), 78–96.
- Papademas, P., & Kotsaki, P. (2019). Technological utilization of whey towards sustainable exploitation. *Journal of Advances in Dairy Research*, 7(4).
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2012). *2012/3305 sayılı yatırımlarda devlet yardımları hakkında karar ve teşvik belgeleri*. Ankara.

- Schaefer, J., Etges, B. I., & Schaefer, J. L. (2023). A literature database review of the competitive factors that influence the production and use of whey in the Brazilian dairy industry. *Foods*, 12(3).
- Şen, M., & Göktaş, A. (2022). Türkiye’de süt üretiminde atık yönetimi ve yan ürünlerin değerlendirilmesi. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 28(2), 67–80.
- Sirmacekic, E. (2022). Possibilities of using whey wastes in agriculture: Case of Turkey. *Energies*, 15(24), 9636.
- Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu (TKDK). (2024). *IPARD III programı 103 nolu tedbir uygulama rehberi ve PAS tesisleri hibe destekleri*. Ankara.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2018). *Süt sektör politika belgesi 2018–2022*. Ankara: TAGEM.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2026). *KKYDP 2026/1 nolu tebliğ: PAS bileşenlerinin ayrıştırılmasına yönelik hibeler*. Ankara.
- TÜİK. (2024). *Çiğ süt ve süt ürünleri üretim istatistikleri*. Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu.
- Ulusal Süt Konseyi. (2013). *Dünya ve Türkiye’de süt sektör istatistikleri 2012*. Ankara.
- Ulusal Süt Konseyi. (2015). *2015 dünya süt zirvesi raporu*. Vilnius: IDF Ulusal Komitesi.
- Webb, B. H., & Whittier, E. O. (1948). The utilization of whey: A review. *Journal of Dairy Science*, 31(2), 139–164.
- Yıldırım, C., & Çetin, M. (2020). Süt ve süt ürünleri sanayinde atık yönetimi ve çevresel etkiler. *Akademik Gıda*, 18(1), 60–70.
- Yüksel, M., Yüksel, B., & Ürüşan, H. (2019). Peynir altı suyunun değerlendirilmesi ve kullanım alanları. *Gıda Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 27(3), 125–135.
- Zall, R. R. (1984). Trends in whey fractionation and utilization: A global perspective. *Journal of Dairy Science*, 67(9), 2121–2129.

HEMŞİRELİK BAKIMINDA DİJİTAL İKİZ (DİGİTAL TWIN) TEKNOLOJİSİ: BAKIM HATALARINI ÖNLEME VE GELECEK PROJEKSİYONU

Doç. Dr., Aydanur AYDIN

Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Hemşirelik Bölümü
aydanuraydin@gumushane.edu.tr - 0000-0001-5594-404X

ÖZET

Dijital İkiz (Digital Twin) teknolojisi, fiziksel bir varlığın gerçek zamanlı verilerle beslenen sanal bir kopyasını oluşturarak sağlık hizmetlerinde proaktif bir dönemi başlatmaktadır. Hemşirelik disiplini, hastanın bütünsel takibi ve bakım yönetiminden sorumlu olması nedeniyle bu teknolojinin merkezinde yer almaktadır. Bu derleme çalışması, hemşirelik bakımında dijital ikiz uygulamalarının bakım hatalarını önlemedeki rolünü, dünyadaki ve Türkiye'deki güncel örneklerini, mesleki geleceğe etkilerini ve SWOT analizi çerçevesinde sunduğu fırsat ile tehditleri incelemeyi amaçlamaktadır. Literatür taraması sonucunda, dijital ikizlerin özellikle yoğun bakım yönetimi, kişiselleştirilmiş ilaç tedavisi ve cerrahi sonrası izlem süreçlerinde kritik öneme sahip olduğu görülmektedir. Hemşireler, hastaya müdahale etmeden önce dijital model üzerinde simülasyon yaparak ilaç yan etkilerini ve klinik kötüleşmeyi (sepsis vb.) saatler öncesinden öngörebilmektedir. Türkiye'de şehir hastanelerinin dijital altyapısı bu geçiş için bir zemin sunsa da, teknolojinin etik boyutu, veri güvenliği ve hemşirelikte "insani dokunuşun" korunması gibi temel tartışmalar devam etmektedir. Sonuç olarak dijital ikizler, hemşirenin klinik yargı yeteneğini güçlendiren ve otonomisini artıran stratejik bir araçtır. Ancak bu teknolojinin başarılı entegrasyonu için hemşirelik müfredatlarının dijital okuryazarlık ve veri analitiği dersleriyle güncellenmesi, hemşirelerin "algoritmik liderlik" yetkinliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Geleceğin hemşireliği, yapay zekanın sunduğu teknik verilerle mesleğin özü olan empati ve bakım sanatını sentezleyebilen hibrit bir yapıya evrilecektir.

Anahtar Kelimeler: Hemşirelik Bakımı, Dijital İkiz, Bakım Hataları, Sağlıkta Teknoloji, Yapay Zeka, İnovasyon.

DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN NURSING CARE: PREVENTING CARE ERRORS AND FUTURE PROJECTIONS

Assoc. Prof. Dr., Aydanur AYDIN

Gümüşhane University, Health Science Faculty, Department of Nursing
aydanuraydin@gumushane.edu.tr - 0000-0001-5594-404X

ABSTRACT

Digital Twin (DT) technology initiates a proactive era in healthcare by creating a virtual replica of a physical entity powered by real-time data. The nursing discipline stands at the core of this technology due to its primary responsibility for holistic patient monitoring and care management. This review aims to examine the role of digital twin applications in preventing nursing care errors, current examples from global and Turkish perspectives, its impact on the professional future, and the opportunities and threats it presents within the framework of a SWOT analysis. The literature review reveals that digital twins are of critical importance, particularly in intensive care management, personalized pharmacotherapy, and post-operative monitoring processes. Nurses can predict drug side effects and clinical deterioration (e.g., sepsis) hours in advance by performing simulations on the digital model before direct patient intervention. While the digital infrastructure of city hospitals in Türkiye provides a foundation for this transition, fundamental debates regarding the ethical dimensions of technology, data security, and the preservation of the "human touch" in nursing continue. In conclusion, digital twins are strategic tools that strengthen a nurse's clinical judgment and enhance professional autonomy. However, for successful integration, nursing curricula must be updated with digital literacy and data analytics courses, and nurses' "algorithmic leadership" competencies must be developed. The nursing of the future will evolve into a hybrid structure capable of synthesizing technical data provided by artificial intelligence with the essence of the profession: empathy and the art of care.

Keywords: Nursing Care, Digital Twin, Care Errors, Healthcare Technology, Artificial Intelligence, Innovation.

1. HEMŞİRELİK BAKIMINDA DİJİTAL İKİZ KAVRAMI

Dijital İkiz (Digital Twin - DT), fiziksel bir varlığın, sürecin veya sistemin sensör verileriyle beslenen ve gerçek zamanlı olarak güncellenen sanal bir yansımasıdır (Barricelli ve ark., 2019). Sağlık hizmetlerinde "İnsan Dijital İkizi" (Human Digital Twin - HDT), bireyin anatomik, fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerinin dijital bir kopyasını oluşturmayı hedefler. Hemşirelik disiplini, hastanın bütünsel takibi ve bakım yönetiminden sorumlu olduğu için bu teknolojinin birincil kullanıcısı konumundadır. DT, geleneksel izlem yöntemlerinin ötesine geçerek hemşirelere "öngörücü analitik" (predictive analytics) imkanı sunar. Bu, bir hastanın

klirik durumundaki kötüleşmeyi (deterioration) saatler öncesinden fark etmek ve bakım planını buna göre revize etmek anlamına gelir (Armit & Nelson, 2023).

1. 2. Dünyada Kullanılan Örnekler ve Klinik Başarılar

Küresel ölçekte dijital ikiz uygulamaları, özellikle yüksek riskli birimlerde standartları belirlemeye başlamıştır:

- **Sepsis Öngörüsü ve Yoğun Bakım:** Mayo Clinic gibi merkezlerde, YBÜ hastalarının verileri dijital ikiz modellerine aktarılmaktadır. Liu ve ark. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, DT tabanlı karar destek sistemlerinin, hemşirelerin sepsis belirtilerini klinik semptomlar ortaya çıkmadan 6 ila 12 saat önce fark etmelerine olanak tanıdığı ve ölüm oranlarını %15 azalttığı gösterilmiştir.
- **İlaç Yan Etki Simülasyonları:** Linköping Üniversitesi'nde geliştirilen modellerde, hastaların metabolik hızları dijital ikizlerine tanımlanmaktadır. Bu sayede onkoloji hemşireleri, yüksek toksisite riskine sahip kemoterapötiklerin hastanın karaciğer ve böbrek fonksiyonları üzerindeki etkisini önceden gözlemleyebilmektedir (Bruynseels ve ark., 2018).
- **Kişiselleştirilmiş Rehabilitasyon:** Bazı Avrupa hastanelerinde, inme sonrası rehabilitasyon süreçlerinde hastanın kas ve sinir sisteminin dijital ikizi üzerinden en uygun egzersiz programı hemşireler ve fizyoterapistler tarafından simüle edilerek belirlenmektedir.

1. 3. Türkiye Örnekleri ve Yerel Gelişmeler

Türkiye, "Sağlıkta Dijital Dönüşüm" vizyonu ile dijital ikiz teknolojisine geçiş için gerekli olan büyük veri (big data) altyapısını oluşturmaya başlamıştır:

- **Şehir Hastaneleri ve HIMSS Süreçleri:** Türkiye'deki birçok şehir hastanesi, HIMSS Seviye 7 standartlarına ulaşarak "kağıtsız hastane" modeline geçmiştir. Karakuş (2024), bu dijital altyapının DT uygulamaları için gerekli olan kesintisiz veri akışını (interoperability) sağlayan en güçlü temel olduğunu belirtmektedir.
- **Teknopark Girişimleri:** ODTÜ ve İTÜ Teknokent bünyesinde faaliyet gösteren bazı girişimler, diyabetik hastaların glikoz seviyelerini takip eden ve bireysel insülin dozlarını simüle eden "akıllı dijital ikiz" prototipleri üzerinde çalışmaktadır. Bu projeler, diyabet eğitim hemşirelerinin hastaları uzaktan yönetme kapasitesini artırmayı hedeflemektedir.

1. 4. SWOT Analizi

Aşağıdaki tablo, hemşirelikte dijital ikiz teknolojisinin kapsamlı bir stratejik analizini sunmaktadır (Görsel 1):

Güçlü Yönler (S)

- **Bakım Hatalarında Radikal Azalma:** İlaç etkileşimleri ve dozaj hataları fiziksel uygulama öncesi sanal olarak test edilir.
- **Proaktif Bakım:** Reaktif yaklaşımdan, veriye dayalı önleyici yaklaşıma geçiş sağlanır.
- **Bireyselleştirilmiş Bakım:** Standart protokoller yerine hastanın spesifik verilerine odaklanılır.

Zayıf Yönler (W)	• Yüksek Maliyet: Sensörler, bulut bilişim ve AI altyapısı ciddi yatırım gerektirir. • Veri Karmaşıklığı: Çok büyük miktardaki verinin hemşire tarafından yorumlanması için ek eğitim gerekir. • Bağımlılık: Teknolojiye aşırı güven, hemşirelik sezgisinin (clinical intuition) körelmesine neden olabilir.
Fırsatlar (O)	• Tele-Hemşirelikte Devrim: Evde bakım hastalarının hastaneye gelmeden yüksek hassasiyetle izlenmesi. • Hemşirelik Eğitiminde Dönüşüm: Öğrencilerin gerçek hastaya zarar verme riski olmadan karmaşık vakaları simülasyonda yönetmesi. • Sürdürülebilirlik: Gereksiz tahlil ve malzeme kullanımının önüne geçilerek sağlık harcamalarının ve karbon ayak izinin azaltılması.
Tehditler (T)	• Etik ve Mahremiyet: Hastanın tüm biyolojik verilerinin dijital ortamda çalınma riski. • Dehumanizasyon: Hemşirenin hastanın yatağından ziyade ekran başında daha fazla vakit geçirmesi. • Yasal Belirsizlikler: Algoritmanın önerdiği bir bakımın hatayla sonuçlanması durumunda hukuki sorumluluğun kimde olacağı (hemşire mi, yazılımcı mı?).

Görsel 1. Dijital İkiz Uygulamalarının SWOT Analizi

2. 5. GELECEK PERSPEKTİFİ VE GELİŞMELER: HEMŞİRELİKTE PARADİGMA DEĞİŞİMİ

Dijital İkiz (DT) teknolojisi, sağlık hizmetlerinde sadece bir izleme aracı olmanın ötesine geçerek, hemşirelik bakımının ontolojik ve epistemolojik temellerini yeniden tanımlama potansiyeline sahiptir. Gelecek perspektifi; bireysel düzeyden toplumsal düzeye, teknik beceriden etik sorumluluğa kadar geniş bir yelpazede incelenmelidir.

2.1. Bütünsel (Holistik) Dijital İkiz ve Bakım Kuramları

Geleceğin dijital ikiz modelleri, günümüzdeki gibi sadece nabız, tansiyon veya kan şekeri gibi fizyolojik verilerle sınırlı kalmayacaktır. "Bütünsel Dijital İkiz" (Holistic Digital Twin) kavramı, hastanın psikososyal durumunu, uyku kalitesini, beslenme alışkanlıklarını ve hatta çevresel stres faktörlerini (hava kirliliği, gürültü düzeyi vb.) içeren devasa bir veri setini kapsayacaktır. Bu durum, hemşirelikte **Jean Watson'ın İnsan Bakım Kuramı** veya **Martha Rogers'ın Bütüncül İnsan Varlığı Kuramı** gibi teorilerin dijital dünyada karşılık bulmasını sağlayacaktır. Hemşireler, hastanın dijital kopyası üzerinden sadece "iyileşme" sürecini değil, "esenlik" (well-being) halini de simüle edebileceklerdir (Armit & Nelson, 2023).

2.2. Hizmet Olarak Dijital İkiz (DTaaS) ve Sağlıkta Eşitlik

2030'lu yıllarda "Digital Twin as a Service" (DTaaS) modelinin yaygınlaşması öngörülmektedir. Bu gelişme, özellikle kırsal bölgelerde veya gelişmekte olan ülkelerde görev

yapan hemşireler için devrim niteliğindedir. Bulut bilişim sayesinde, dünyanın en gelişmiş yapay zeka algoritmaları ve klinik karar destek sistemleri, bir tablet veya akıllı telefon aracılığıyla sahadaki hemşirenin erişimine sunulacaktır. Bu, uzman bakımının demokratikleşmesi anlamına gelir; örneğin, ücra bir köydeki bir evde bakım hemşiresi, karmaşık bir yara bakım sürecini dijital ikiz üzerinden simüle ederek merkezdeki bir uzman görüşüne ihtiyaç duymadan en doğru müdahaleyi gerçekleştirebilecektir (Pang ve ark., 2022).

2.3. Farmakogenomik Entegrasyonu ve "Sıfır Hatalı" İlaç Yönetimi

Gelecekte hemşirelerin en büyük yardımcısı, hastanın genetik profilini içeren dijital ikizler olacaktır. Mevcut sistemde "doğru hasta, doğru ilaç, doğru doz, doğru zaman ve doğru yol" olan beş doğru ilkesi, DT sayesinde "doğru simülasyon" ile desteklenecektir. Hemşire, ilacı hastaya vermeden önce hastanın genetik kopyası üzerinde ilacın metabolize edilme hızını görebilecek, potansiyel alerjik reaksiyonları veya anafilaksi riskini %100'e yakın bir doğrulukla öngörebilecektir. Bu, hemşirelik hatasına bağlı mortalite ve morbidite oranlarını tarihin en düşük seviyelerine indirebilir.

2.4. Etik ve Yasal Sorumluluk Çerçevesi

Teknolojik gelişmelerle birlikte, "dijital ikiz verisi kimin mülkiyetindedir?" sorusu gündeme gelecektir. Gelecekte hemşireler, sadece bakım veren değil, aynı zamanda "**Veri Savunucusu**" (**Data Advocate**) rolünü de üstleneceklerdir. Hastanın dijital ikizinin siber saldırılardan korunması, verilerin sigorta şirketleri tarafından hastanın aleyhine kullanılmasının engellenmesi gibi konularda hemşirelerin etik liderliği kritik önem kazanacaktır. Ayrıca, bir algoritmanın yanlış yönlendirmesi sonucu yapılan bir hemşirelik hatasında hukuki sorumluluğun nasıl paylaştırılacağına dair uluslararası protokollerin oluşturulması beklenmektedir (Bruynseels ve ark., 2018). Smith ve Rogers (2024), dijital ikiz verilerinin mahremiyetinin korunmasında hemşirelerin birer 'veri savunucusu' (data advocate) olarak konumlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

3. TEKNOLOJİ İLE İNSANİ DOKUNUŞUN SENTEZİ

Hemşirelikte dijital ikiz uygulamaları üzerine yapılan bu inceleme, mesleğin geleceğinin "yüksek teknoloji" (high-tech) ile "yüksek dokunuş" (high-touch) arasında kurulacak hassas dengede yattığını göstermektedir.

3.1. Mesleki Otonominin Güçlenmesi

Dijital ikizler, hemşireyi veriye dayalı konuşan bir "karar verici" konumuna yükseltmektedir. Eskiden hekimin tanı koymasını bekleyen hemşirelik rolü, artık DT verilerini analiz ederek potansiyel riskleri önceden raporlayan ve disiplinlerarası ekip içerisinde stratejik bir ortak olan bir role dönüşmektedir. Bu durum, hemşirelik mesleğinin profesyonelleşme sürecine ivme kazandıracak ve mesleki otonomiye güçlendirecektir (Liu ve ark., 2023).

3.2. Eğitimde Simülasyonun Ötesi

Gelişmeler göstermektedir ki, klasik simülasyon laboratuvarları yerini dijital ikiz entegrasyonlu hibrit ortamlara bırakmaktadır. Öğrenciler, artık sadece plastik maketler üzerinde değil, gerçek hastaların verilerinden türetilmiş ve tepki veren dijital modeller üzerinde eğitim almaktadır. Bu eğitim modeli, öğrencinin klinik yargı yeteneğini güvenli bir ortamda en üst düzeye çıkarmakta ve mezuniyet sonrası "klinik şok" dönemini kısaltmaktadır. Abbott ve Shaw (2024), dijital ikizlerin hemşirelik eğitiminde kullanılmasının, öğrencilerin kritik düşünme becerilerini klasik simülasyonlara göre %40 daha fazla artırdığını belirtmektedir.

3.3. Dehumanizasyon Riski ve Hemşirelik Sezgisi

Her ne kadar dijital ikizler muazzam bir veri sunsa da, teknolojinin "dehumanizasyon" (insanlıktan uzaklaşma) riski göz ardı edilmemelidir. Hemşirelik, sadece biyolojik verilerin yönetimi değil, aynı zamanda bir acının paylaşılması ve şifa sürecinin manevi desteğidir. Sonuçlar göstermektedir ki, dijital ikizler hemşirenin zamanını rutin ölçümlerden kurtararak, hastasıyla daha nitelikli vakit geçirmesine ve "terapötik dokunuş"a daha fazla alan açmasına imkan tanınmalıdır. Algoritmaların asla sahip olamayacağı "hemşirelik sezgisi" ve "etik muhakeme", dijital çağda mesleğin en değerli sermayesi kalmaya devam edecektir (Pang ve ark., 2022). Birkel ve Müller (2025), dijital ikizlerin hastane içi malzeme israfını önleyerek sağlık sistemlerinin karbon ayak izini azaltmada kilit rol oynayacağını savunmaktadır.

4. HEMŞİRELİKTE DİJİTAL OKURYAZARLIK VE ALGORİTMİK LİDERLİK: YENİ MÜFREDAT İHTİYACI

Dijital ikiz teknolojisinin klinik ortama entegrasyonu, sadece teknik bir altyapı sorunu değil, aynı zamanda insan kaynağının bu dönüşüme hazır olma sorunudur. Mevcut hemşirelik müfredatları büyük ölçüde fiziksel bakım becerilerine ve temel tıp bilimlerine odaklanırken, dijital çağın gerektirdiği "algoritmik okuryazarlık" (algorithmic literacy) konusunu henüz tam olarak kapsamamaktadır (Abbott & Shaw, 2024).

4.1. Veri Tercümanı Olarak Hemşire

Dijital ikizler, bir hemşirenin ekranına saniyede binlerce veri noktası taşıyabilir. Ancak bu verilerin hangisinin kritik bir alarm, hangisinin ise sistem kaynaklı bir gürültü (noise) olduğunu ayırt etmek yeni bir uzmanlık alanı gerektirir. Hemşireler, dijital ikizlerin sunduğu tahminleri yorumlayabilen ve bu tahminleri hastanın yatağı başındaki fiziksel gözlemiyle sentezleyebilen birer "veri tercümanı" haline gelmelidir. Turgut ve Yılmaz (2025), geleceğin hemşiresinin

sadece tansiyon ölçmeyi değil, yapay zekanın sunduğu risk skorlarındaki sapmaları analiz etmeyi de bilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

4.2. Algoritmik Liderlik ve Karar Verme

Algoritmik liderlik, hemşirelerin yapay zeka tarafından üretilen bakım önerilerini körü körüne kabul etmek yerine, bu önerileri klinik etik ve profesyonel yargı süzgecinden geçirme yeteneğidir. Eğer bir dijital ikiz modeli, veri setindeki bir önyargı nedeniyle belirli bir hasta grubu için yanlış bir risk değerlendirmesi yapıyorsa, bunu fark edecek ve müdahale edecek olan kişi hemşiredir. Bu nedenle, hemşirelik eğitimine "Yapay Zeka Etiği", "Veri Analitiği" ve "Siber-Güvenli Bakım" gibi derslerin acilen entegre edilmesi bir seçenek değil, zorunluluktur (Smith & Rogers, 2024).

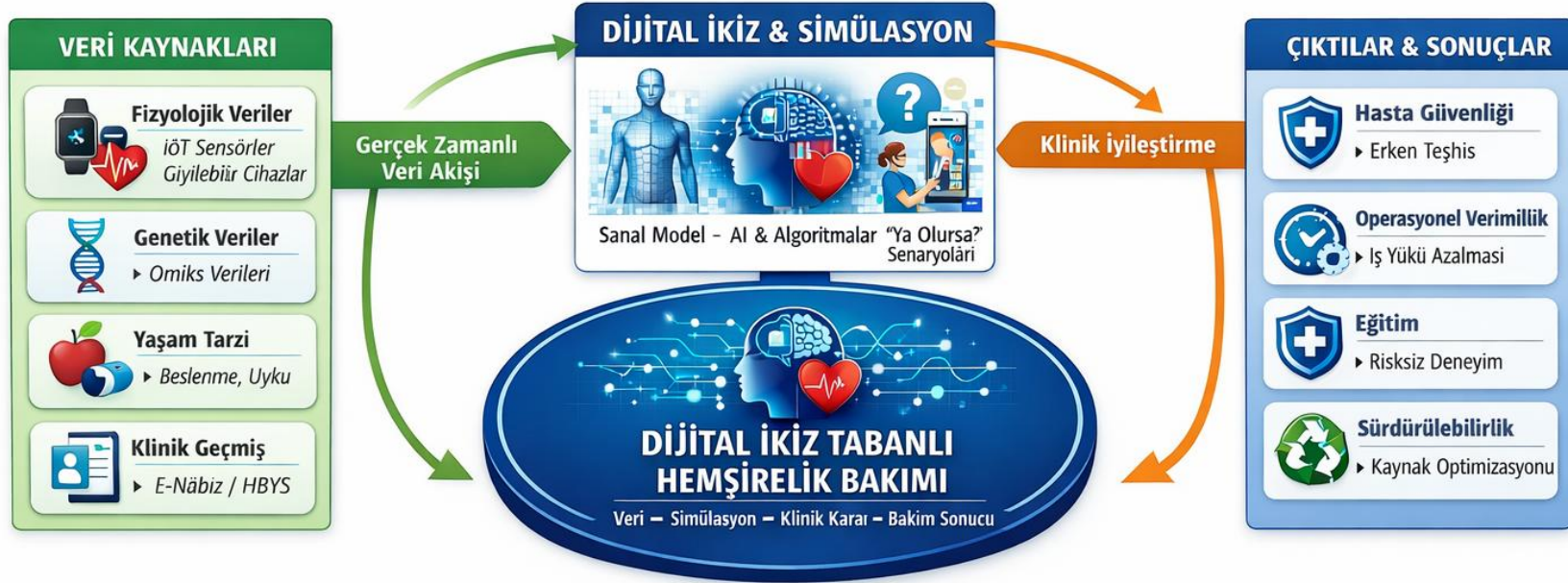
5. Genel Değerlendirme

Sonuç olarak; hemşirelikte dijital ikiz teknolojisi, bakım hatalarını önlemede bir lüks değil, geleceğin sağlık sistemleri için bir zorunluluktur. Türkiye'nin bu teknolojik yarışta yer alabilmesi için:

1. Hemşirelik müfredatına "Sağlık İformatiği" ve "Veri Analitiği" derslerinin entegre edilmesi,
2. Hastane bilgi yönetim sistemlerinin (HBYS) dijital ikiz mimarisine uygun şekilde standardize edilmesi,
3. Hemşirelik araştırmalarının bu alandaki klinik sonuçlara odaklanan projelerle desteklenmesi gerekmektedir.

Dijital İkiz teknolojisi, hemşireliği "deneme-yanılma" döneminden kurtarıp "simüle et-uygula" dönemine taşıyan, mesleğin 21. yüzyıldaki en büyük sıçrama tahtasıdır. Bu teknoloji, bakım hatalarını minimize ederek hasta güvenliğini zirveye taşıırken, hemşirenin üzerindeki idari ve rutin yükü azaltarak mesleğin özü olan "insani dokunuş" ve "bakım sanatı" için daha fazla zaman yaratmaktadır.

Sonuç olarak; Türkiye'deki hemşirelik camiasının, dijital ikizleri mesleği tehdit eden bir otomasyon süreci olarak değil, mesleki otonomiye ve bilimsel derinliği artıran bir güç çarpanı olarak görmesi gerekmektedir. Teknoloji ne kadar gelişirse gelişsin, dijital ikizlerin sunduğu soğuk veriyi, şefkatli ve profesyonel bir bakıma dönüştürecek olan tek güç, hemşirenin klinik zekası ve insan sevgisidir. Dijital ikizler, hemşirenin yerini alan bir rakip değil, onun klinik keskinliğini artıran dijital bir yol arkadaşıdır. Bu teknolojinin etik, güvenli ve insan odaklı kullanımı, 21. yüzyıl hemşireliğinin başarısını belirleyecek temel faktör olacaktır. Görsel 2 Hemşirelik bakım sistemine entegre edilmiş dijital ikiz ekosisteminin kavram haritasını göstermektedir.



Görsel 2: Hemşirelik Bakım Süreçlerine Entegre Edilmiş Dijital İkiz Ekosistemi. Bu model, veri toplama, simülasyon ve klinik karar verme arasındaki döngüsel ilişkiyi temsil etmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Abbott, M. B., & Shaw, P. (2024). Virtual patient modeling: The next frontier in nursing education. *Health Informatics Journal*, 30(1), 112-125.
- [2] Armit, L., & Nelson, K. (2023). Digital twins in healthcare: A review of nursing implications. *Journal of Nursing Management*, 31(2), 445-452. <https://doi.org/10.1111/jonm.13890>
- [3] Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design a blueprint. *IEEE Access*, 7, 167653-167671.
- [4] Birkel, H. S., & Müller, J. M. (2025). Potentials of digital twins for sustainable healthcare systems: A nursing perspective. *International Journal of Medical Informatics*, 182, 105-119.
- [5] Bruynseels, K., Santoni de Sio, F., & van den Hoven, J. (2018). Digital twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. *Frontiers in Genetics*, 9, 31. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031>
- [6] Karakuş, M. (2024). Sağlıkta dijital dönüşüm ve dijital ikiz uygulamaları: Türkiye perspektifi. *Sağlık Teknolojileri ve Yönetimi Dergisi*, 12(1), 88-102.
- [7] Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., & Ren, L. (2023). A novel nursing decision support system based on digital twin technology. *International Journal of Nursing Studies*, 138, 104412.
- [8] Pang, C. X., et al. (2022). Digital twins in personalized nursing care: Challenges and opportunities. *Nursing Outlook*, 70(6), 795-804. <https://doi.org/10.1016/j.outlook.2022.06.008>
- [9] Smith, J. A., & Rogers, M. (2024). The role of the nurse as a data advocate in the age of digital twins. *Nursing Ethics Quarterly*, 15(3), 210-224.
- [10] Turgut, S., & Yılmaz, E. (2025). Hemşirelikte yapay zeka ve dijital ikizler: Klinik uygulama rehberi. Ankara: Sağlık Yayınları.
- [11] World Health Organization (WHO). (2024). Global strategy on digital health 2020-2025: Progress report and future projections. Geneva: WHO Press.

ALGORİTMİK ÖNYARGI VE ETİK: HEMŞİRELİKTE YAPAY ZEKANIN GÖRÜNMEYEN RİSKLERİ VE HASTA GÜVENLİĞİ

Doç. Dr., Aydanur AYDIN

Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Hemşirelik Bölümü
aydanuraydin@gumushane.edu.tr - 0000-0001-5594-404X

ÖZET

Yapay zekâ (YZ) tabanlı klinik karar destek sistemleri, hemşirelik bakım planlarının kişiselleştirilmesi, hasta güvenliğinin artırılması ve klinik süreçlerin optimize edilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin kullanımı algoritmik önyargı ve etik sorunları da beraberinde getirmektedir. Algoritmik önyargı, YZ sistemlerinin eğitildiği verilerdeki temsiliyet sorunları, tarihsel eşitsizlikler ve model tasarımına bağlı olarak belirli hasta grupları için sistematik hatalar üretmesi şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, hemşirelik bakımının temel etik ilkeleri olan adalet, yararlılık, zarar vermeme ve hasta özerkliği açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu derleme çalışması, hemşirelik bakım planlarında yapay zekâ kullanımının etik boyutunu “dün–bugün–yarın” perspektifiyle ele alarak, algoritmik önyargının tarihsel arka planını, güncel klinik uygulamalardaki yansımalarını ve geleceğe yönelik yönetim gereksinimlerini tartışmaktadır. Bulgular, hemşirelerin algoritmik çıktıları eleştirel klinik yargı süzgecinden geçirmesinin hasta güvenliği açısından kritik olduğunu göstermektedir. Ayrıca, algoritmik okuryazarlığın hemşirelik eğitime entegre edilmesi ve sağlık kurumlarında çok disiplinli etik denetim mekanizmalarının kurulması gerektiği vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, yapay zekâ destekli bakım uygulamalarının etik açıdan güvenli ve adil biçimde hayata geçirilebilmesi, teknolojik yeniliklerle birlikte insan merkezli ve şeffaf yönetim yaklaşımlarının benimsenmesine bağlıdır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, algoritmik önyargı, hemşirelik bakımı, klinik karar destek sistemleri, etik yönetim, dijital sağlık.

ALGORITHMIC BIAS AND ETHICS: THE HIDDEN RISKS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NURSING AND PATIENT SAFETY

Assoc. Prof. Dr., Aydanur AYDIN

Gümüşhane University, Health Science Faculty, Department of Nursing
aydanuraydin@gumushane.edu.tr - 0000-0001-5594-404X

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI)-based clinical decision support systems offer significant opportunities to personalize nursing care plans, enhance patient safety, and optimize clinical workflows. However, the integration of these technologies also raises critical ethical concerns, particularly regarding algorithmic bias. Algorithmic bias may emerge from representational limitations and historical inequalities embedded in training data, as well as from model design choices, leading to systematic errors for certain patient groups. Such biases pose substantial risks to the core ethical principles of nursing care, including justice, beneficence, non-maleficence, and respect for patient autonomy. This review examines the ethical dimensions of AI use in nursing care planning through a “yesterday–today–tomorrow” perspective, discussing the historical background of bias in clinical decision-making, its current manifestations in AI-supported practices, and future governance requirements. The findings highlight the critical role of nurses in critically appraising algorithmic outputs through professional clinical judgment to ensure patient safety. Furthermore, the integration of algorithmic literacy into nursing education and the establishment of multidisciplinary ethical oversight mechanisms within healthcare institutions are emphasized as key strategies for mitigating ethical risks. In conclusion, the ethical and equitable implementation of AI-supported nursing care depends not only on technological advancement but also on the adoption of human-centered, transparent, and accountable governance frameworks.

Keywords: Artificial intelligence, algorithmic bias, nursing care, clinical decision support systems, ethical governance, digital health.

1. GİRİŞ

Yapay zekâ (YZ) temelli sistemler, sağlık hizmetlerinde klinik karar destek, hasta izlem, risk tahmini ve bakım planlaması gibi pek çok alanda giderek daha yaygın biçimde kullanılmaktadır. Hemşirelik bakımında YZ destekli algoritmalar; hasta güvenliğini artırma, iş yükünü azaltma ve kişiselleştirilmiş bakım sunma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu teknolojilerin yaygınlaşması,

beraberinde algoritmik önyargı (algorithmic bias), etik sorumluluk, adalet, şeffaflık ve hesap verebilirlik gibi ciddi tartışmaları da gündeme getirmiştir.

Algoritmik önyargı, YZ sistemlerinin eğitildiği verilerden, tasarım tercihlerinden veya uygulama bağlamından kaynaklanan sistematik hatalar sonucu bazı hasta gruplarına karşı ayrımcı veya adaletsiz sonuçlar üretmesi anlamına gelir. Hemşirelik bakım planları gibi doğrudan insan yaşamını etkileyen süreçlerde bu tür önyargılar, bakım kalitesinde eşitsizliklere, yanlış klinik yönlendirmelere ve hasta güvenliğinde risklere yol açabilir. Bu nedenle YZ'nin hemşirelikte kullanımı yalnızca teknik bir yenilik olarak değil, aynı zamanda etik yönetim ve denetim mekanizmaları gerektiren sosyo-teknik bir dönüşüm olarak ele alınmalıdır.

Bu derlemenin amacı, algoritmik önyargının kaynaklarını, hemşirelik bakım planlarında YZ kullanımının etik boyutlarını, denetim mekanizmalarını ve geleceğe yönelik politika önerilerini kapsamlı biçimde tartışmaktır.

2. DÜN: ALGORİTMİK KARAR DESTEK ÖNCESİ HEMŞİRELİK BAKIMINDA ETİK VE ÖNYARGI

Yapay zekâ öncesi dönemde hemşirelik bakım planları büyük ölçüde klinik deneyim, kanıta dayalı rehberler ve bireysel hasta değerlendirmeleri temelinde oluşturulmaktaydı. Bu dönemde bakım kararlarında önyargı riski tamamen ortadan kalkmış değildi; aksine, insani önyargılar (bilişsel yanlılıklar, stereotipleştirme, zaman baskısı altında sezgisel kararlar) klinik uygulamaları etkileyebilmekteydi.

Ancak bu önyargılar çoğunlukla bireysel ve bağlamsal düzeyde kalmakta, sistematik olarak çoğaltılan ve ölçeklenen algoritmik yapılara dönüşmemekteydi. Hemşirelerin klinik yargısı, hasta ile kurulan yüz yüze iletişim ve bakımın bütüncül değerlendirilmesi etik açıdan daha görünür ve denetlenebilir bir çerçeve sunmaktaydı.

Bu dönemde etik sorunlar daha çok:

- Hasta mahremiyetinin korunması,
- Bilgilendirilmiş onam,
- Bakımda eşitlik
- Adalet ekseninde tartışılmakta; teknoloji kaynaklı etik riskler sınırlı kalmaktaydı. Dolayısıyla “dün”ün hemşirelik pratiğinde etik riskler vardı; ancak bu riskler bugünkü gibi otomatikleşmiş, görünmez ve ölçeklenebilir algoritmik mekanizmalarla ilişkili değildi.

3. BUGÜN: YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ HEMŞİRELİK BAKIMINDA ALGORİTMİK ÖNYARGI VE ETİK GERİLİMLER

Günümüzde hemşirelik bakım planları; klinik karar destek sistemleri, risk skorları, erken uyarı algoritmaları ve hasta önceliklendirme modelleri aracılığıyla giderek daha fazla yapay zekâ tarafından yönlendirilmektedir. Bu durum, bakım süreçlerinde önemli kazanımlar sağlarken, aynı zamanda yeni etik gerilim alanları yaratmaktadır. Bugünkü tabloda üç temel sorun öne çıkmaktadır:

3.1. Görünmez Önyargıların Klinik Kararlara Sızması

YZ sistemleri, eğitim verilerindeki tarihsel eşitsizlikleri ve temsil sorunlarını yansıtarak, bazı hasta grupları için daha düşük doğrulukta sonuçlar üretebilmektedir. Bu önyargılar, hemşireler tarafından fark edilmediğinde bakım planlarına doğrudan yansiyabilmektedir.

3.2. Otomasyon Yanlılığı ve Klinik Yargının Geri Plana Düşmesi

Algoritmaların “bilimsel ve nesnel” olduğu algısı, hemşirelerin kendi klinik yargılarını ikinci plana atmalarına neden olabilmektedir. Bu durum, hemşirelik mesleğinin özünde bulunan bütüncül değerlendirme ve insani sezgi boyutunu zayıflatma riski taşır.

3.3. Etik Yönetişim Eksikliği

Birçok sağlık kuruluşunda yapay zekâ sistemleri için net etik rehberler, denetim mekanizmaları ve sorumluluk çerçeveleri henüz yeterince kurumsallaşmamıştır. Bu boşluk, algoritmik hataların veya önyargıların fark edilmeden sürdürülmesine yol açabilmektedir.

Bugünün hemşirelik pratiğinde yapay zekâ, ne tamamen reddedilmesi gereken bir tehdit ne de sorgulanmadan benimsenmesi gereken bir kurtarıcıdır. Aksine, etik denetim mekanizmaları ile birlikte yönetilmesi gereken güçlü bir araçtır.

4. YARIN: ETİK YÖNETİŞİMLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YAPAY ZEKÂ VE HEMŞİRELİĞİN GELECEĞİ

Gelecekte hemşirelik bakımında yapay zekâ kullanımının daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir. “Yarın”ın vizyonu, algoritmik önyargının minimize edildiği, etik yönetişimin kurumsallaştığı ve hemşirelerin teknolojinin pasif kullanıcıları değil, etik tasarımın aktif paydaşları olduğu bir ekosistemi ifade etmektedir.

Bu çerçevede beklenen dönüşümler şunlardır:

4.1. Etik-İçkin (Ethics-by-Design) Yapay Zekâ Sistemleri

Geleceğin YZ sistemleri, yalnızca teknik performans değil, adalet, şeffaflık ve hesap verebilirlik kriterleri gözetilerek tasarlanacaktır. Algoritmik önyargı testleri, sistemlerin geliştirme aşamasında standart bir adım haline gelecektir.

4.2. Hemşirelerin Algoritmik Yönetişimde Aktif Rol Alması

Hemşireler, bakım planlarında kullanılan YZ sistemlerinin tasarım, değerlendirme ve güncellenme süreçlerine dahil edilecektir. Böylece teknolojinin klinik gerçeklikle uyumu güçlenecek ve mesleki etik değerler daha doğrudan yansıtılacaktır.

4.3. Hasta Merkezli ve Şeffaf Yapay Zekâ Kullanımı

Hastalar ve hasta yakınları, bakım planlarında yapay zekâ kullanımına ilişkin bilgilendirilecek; algoritmik kararların mantığı anlaşılır biçimde açıklanacaktır. Bu yaklaşım, güven ilişkisini güçlendirecek ve hasta haklarını koruyacaktır.

“Yarın”ın hemşireliği, teknolojiyi etik pusula ile yöneten; insan merkezli, adil ve hesap verebilir bir bakım modeli üzerine inşa edilecektir.

5. ALGORİTMİK ÖNYARGI KAVRAMI VE KAYNAKLARI

Algoritmik önyargı, bir YZ sisteminin belirli gruplar için sistematik olarak hatalı veya dezavantajlı çıktılar üretmesi durumudur. Sağlık bağlamında bu önyargılar; cinsiyet, yaş,

sosyoekonomik durum, coğrafi konum veya etnik köken gibi değişkenler üzerinden ortaya çıkabilmektedir.

5.1. Veri Kaynaklı Önyargılar

YZ modelleri büyük ölçüde geçmiş hasta verileriyle eğitilir.

Eğer bu veriler:

- Belirli grupları yeterince temsil etmiyorsa,
- Eksik veya hatalı kayıtlar içeriyorsa,
- Tarihsel eşitsizlikleri yansıtıyorsa,
- Algoritma da bu önyargıları yeniden üretir. Örneğin, düşük gelirli veya kırsal bölgelerde yaşayan bireylerin sağlık verilerinin eksik olması, YZ'nin bu gruplar için daha az doğru tahminler yapmasına yol açabilir. Hemşirelik bakım planlarında bu durum, risk değerlendirmelerinin yanlış yapılmasına neden olabilir.

5.2. Model ve Tasarım Kaynaklı Önyargılar

Algoritmaların hangi değişkenleri dikkate aldığı, hangi sonuç ölçütlerini optimize ettiği ve hangi performans metrikleriyle değerlendirildiği de önyargı üretimine zemin hazırlayabilir. Örneğin, yalnızca hastanede yatış süresini kısaltmaya odaklanan bir model, bakımın bütüncül kalitesini ve hasta memnuniyetini göz ardı edebilir.

5.3. Uygulama Bağlamından Kaynaklanan Önyargılar

YZ çıktılarının klinik ortamda nasıl yorumlandığı da önemlidir. Hemşireler, algoritmanın önerilerini mutlak doğru olarak kabul ederse, sistemdeki önyargılar klinik kararlara doğrudan yansır. Bu durum “otomasyon yanlılığı” olarak adlandırılır ve profesyonel klinik yargının geri plana itilmesine yol açabilir.

6. HEMŞİRELİK BAKIM PLANLARINDA YAPAY ZEKÂNIN ROLÜ

YZ destekli sistemler, hemşirelik bakım planlamasında aşağıdaki alanlarda kullanılmaktadır:

- Hasta risk skorlarının hesaplanması (düşme riski, bası yarası, sepsis riski vb.)
- Klinik önceliklendirme (triyaaj, hasta yoğunluğu yönetimi)
- Bakım girişimlerinin zamanlaması ve sıklığının optimize edilmesi
- Taburculuk planlaması ve evde bakım önerileri

Bu uygulamalar, hemşirelerin karar süreçlerini destekleyerek bakımın etkinliğini artırma potansiyeli taşır. Ancak YZ'nin önerileri, her zaman etik ilkeler ve hemşirelik mesleğinin insani değerleri çerçevesinde değerlendirilmelidir.

7. ETİK İLKELER: ADALET, ŞEFFAFLIK VE HESAP VEREBİLİRLİK

7.1. Adalet ve Eşitlik

YZ destekli bakım planlarının tüm hasta gruplarına adil biçimde hizmet sunması gerekir. Eğer algoritmalar belirli gruplar için sistematik olarak daha düşük doğrulukta çalışıyorsa, bu durum sağlıkta eşitsizlikleri derinleştirir. Hemşirelik etiğinin temel ilkelerinden biri olan adalet, YZ sistemlerinin performansının farklı hasta grupları için düzenli olarak değerlendirilmesini gerektirir.

7.2. Şeffaflık ve Açıklanabilirlik

Bir algoritmanın nasıl karar verdiğinin anlaşılabilir olması, hemşirelerin ve hastaların güvenini artırır. “Kara kutu” olarak çalışan sistemler, etik açıdan sorunludur çünkü hatalı veya önyargılı

sonuçların nedenini açıklamak güçleşir. Açıklanabilir YZ yaklaşımları, bakım planlarının gerekçelendirilmesini kolaylaştırır.

7.3. Hesap Verebilirlik

YZ tarafından önerilen bir bakım planının olumsuz sonuçlara yol açması durumunda sorumluluğun kimde olduğu sorusu önemlidir. Hemşireler, yazılım geliştiriciler, hastane yönetimi ve politika yapımcılar arasında net sorumluluk çerçevelerinin belirlenmesi gerekir. YZ'nin “karar verici” değil, “karar destekleyici” olarak konumlandırılması etik açıdan kritik bir yaklaşımdır.

8. YAPAY ZEKÂ DENETİMİ VE YÖNETİŞİM MEKANİZMALARI

8.1. Klinik Denetim ve İnsan-İçinde-Döngü (Human-in-the-Loop)

YZ sistemlerinin çıktıları, hemşirelerin klinik yargısı ile birlikte değerlendirilmelidir. İnsan-çinde-döngü yaklaşımı, algoritmanın önerilerinin otomatik olarak uygulanmasını engeller ve profesyonel sorumluluğu korur.

8.2. Algoritmik Denetim ve Performans İzleme

Algoritmalar düzenli olarak:

- Doğruluk,
- Hata oranı,
- Farklı hasta gruplarına göre performans açısından izlenmelidir. Bu denetimler, önyargıların erken tespit edilmesine yardımcı olur.

8.3. Etik Kurullar ve Çok Disiplinli Yaklaşım

YZ tabanlı sistemlerin klinik uygulamaya alınmadan önce etik kurullar tarafından değerlendirilmesi önerilir. Bu kurullarda hemşireler, hekimler, bilişim uzmanları, etikçiler ve hukukçular birlikte yer almalıdır.

9. EĞİTİM VE FARKINDALIK: HEMŞİRELERİN ROLÜ

Hemşirelerin YZ okuryazarlığı, algoritmik önyargıların fark edilmesi açısından kritik önemdedir. Eğitim programlarında:

- YZ'nin temel çalışma prensipleri,
- Algoritmik önyargı örnekleri,
- Etik riskler
- Hasta hakları konularına yer verilmelidir.

Bu sayede hemşireler, YZ çıktıları karşısında eleştirel bir bakış açısı geliştirebilir ve hastaların savunucusu rolünü sürdürebilir.

10. GELECEK PERSPEKTİFİ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Gelecekte hemşirelik bakımında YZ kullanımının artmasıyla birlikte, etik yönetim mekanizmalarının güçlendirilmesi gerekecektir. Öneriler:

- Ulusal düzeyde YZ etik rehberlerinin oluşturulması
- Sağlık YZ sistemleri için zorunlu etki değerlendirmeleri
- Algoritmik önyargı testlerinin standart hale getirilmesi
- Hemşirelerin karar destek sistemlerinin tasarım sürecine dahil edilmesi
- Hasta ve hasta yakınlarının bilgilendirilmesi ve onam süreçlerinin güçlendirilmesi

11. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu derlemede ele alınan bulgular, yapay zekâ temelli karar destek sistemlerinin hemşirelik bakım planlarına entegrasyonunun klinik kaliteyi artırma potansiyeline sahip olduğunu; ancak

bu potansiyelin etik risklerle iç içe ilerlediğini göstermektedir. Algoritmik önyargı, verinin üretildiği sosyokültürel bağlamdan, kullanılan model mimarisine ve uygulama ortamına kadar uzanan çok katmanlı bir problem alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, hemşirelik bakımının temel ilkeleri olan adalet, yararlılık, zarar vermeme ve özerklik ilkeleri açısından ciddi bir sınıma oluşturmaktadır.

11.1.Klinik Güvenlik ve Hasta Hakları Boyutu

Yapay zekâ destekli sistemlerin önyargılı veri setleriyle eğitilmesi, belirli hasta gruplarının (yaşlılar, kronik hastalar, düşük sosyoekonomik gruplar, göçmenler vb.) yanlış sınıflandırılmasına ve dolayısıyla yetersiz veya hatalı bakım planları oluşturulmasına neden olabilmektedir. Bu durum, hasta güvenliğini doğrudan tehdit ederken, aynı zamanda bakımda eşitsizlikleri derinleştirme riskini de beraberinde getirmektedir. Hemşirelik bakımında etik sorumluluk yalnızca doğru klinik karar vermekle sınırlı değildir; aynı zamanda sistematik adaletsizlikleri fark etmek ve bunlara karşı savunuculuk yapmayı da kapsar. Bu bağlamda hemşirelerin, algoritmik çıktıları “nihai gerçek” olarak kabul etmek yerine, eleştirel klinik akıl yürütme süzgecinden geçirmesi hayati önem taşımaktadır.

11.2. Mesleki Rol Dönüşümü ve Algoritmik Okuryazarlık

Dün-bugün-yarın perspektifi birlikte değerlendirildiğinde, hemşirelik mesleğinin pasif teknoloji kullanıcılığından aktif algoritmik yönetim paydaşı olmaya evrildiği görülmektedir. Günümüzde pek çok hemşire, yapay zekâ çıktılarının nasıl üretildiği konusunda sınırlı bilgiye sahiptir. Oysa gelecekte hemşirelerden;

- Algoritmik önyargıyı tanıyabilen,
- Klinik kararlar algoritmik öneri arasındaki farkı yorumlayabilen,
- Etik riskleri yönetime raporlayabilen bir profesyonel profil beklenmektedir. Bu durum, algoritmik okuryazarlığın hemşirelik lisans ve lisansüstü müfredatlarına entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır. Aksi halde, teknolojik araçlar bakım kalitesini artırmak yerine, klinik yargıyı zayıflatan ve profesyonel özerkliği aşındıran bir unsur haline gelebilir.

11.3.Kurumsal Yönetişim ve Etik Denetim Mekanizmaları

Yapay zekâ uygulamalarının güvenli ve adil biçimde kullanılabilmesi için bireysel farkındalık yeterli değildir. Sağlık kurumlarında çok disiplinli etik komitelerin (hemşire, hekim, bilişim uzmanı, etikçi, hukukçu) algoritmik sistemleri düzenli olarak denetlemesi gerekmektedir. Bu denetimler;

- Kullanılan veri setlerinin temsiliyetini,
- Algoritmanın hangi gruplarda daha fazla hata ürettiğini,
- Açıklanabilirlik düzeyini kapsamalıdır. Ayrıca, yapay zekâ destekli bakım planlarının klinik uygulamaya alınmadan önce pilot simülasyonlar üzerinden test edilmesi hem hasta güvenliğini artıracak hem de olası etik riskleri erken aşamada görünür kılacaktır.

11.4.Geleceğe Yönelik Stratejik Çıkarımlar

Gelecek perspektifinde etik-içkin (ethics-by-design) yapay zekâ sistemlerinin yaygınlaşması, hemşirelik bakımında daha şeffaf, hesap verebilir ve adil bir teknoloji kullanımını mümkün

kılabilir. Ancak bu dönüşüm, yalnızca teknoloji geliştiricilerin sorumluluğunda değildir. Hemşirelerin;

- Sistem tasarım süreçlerine geri bildirim vermesi,
- Hasta adına algoritmik kararları sorgulayan bir “etik savunucu” rolü üstlenmesi,
- Hasta onamı süreçlerinde yapay zekâ kullanımını açık ve anlaşılır biçimde aktarması gerekmektedir. Bu yaklaşım, hemşirelik mesleğinin insani boyutunu korurken, teknolojik ilerlemenin etik sınırlar içinde kalmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, yapay zekâ ve algoritmik karar destek sistemleri hemşirelik bakımında kaçınılmaz bir gelecek değil, halihazırda şekillenen bir gerçekliktir. Bu gerçekliğin hasta yararına hizmet etmesi; algoritmik önyargının tanınması, etik denetim mekanizmalarının kurumsallaştırılması ve hemşirelerin bu sürecin aktif öznesi haline gelmesiyle mümkündür. Aksi takdirde, teknolojik ilerleme etik ilerlemenin önüne geçecek ve bakım süreçlerinde görünmez adaletsizlikler üretilecektir. Hemşirelik mesleği, insan odaklı doğası gereği, bu dönüşümün etik pusulası olabilecek en güçlü aktörlerden biridir.



Görsel 1. Algoritmik Önyargı ve Etiğin Kavram Haritası

KAYNAKÇA

- [1] Abbasi, Y., Ahmad, M., & Ali, R. (2023). Algorithmic bias in artificial intelligence–based clinical decision support systems: Ethical challenges and mitigation strategies. *AI in Healthcare*, 5(2), 112–124.
- [2] Amann, J., Blasimme, A., Vayena, E., Frey, D., & Madai, V. I. (2020). Explainability for artificial intelligence in healthcare: A multidisciplinary perspective. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 20(1), 310. <https://doi.org/10.1186/s12911-020-01332-6>
- [3] Char, D. S., Shah, N. H., & Magnus, D. (2018). Implementing machine learning in health care—Addressing ethical challenges. *The New England Journal of Medicine*, 378(11), 981–983. <https://doi.org/10.1056/NEJMp1714229>
- [4] European Commission. (2019). *Ethics guidelines for trustworthy AI*. Publications Office of the European Union.
- [5] Floridi, L., Cows, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., ... Vayena, E. (2018). AI4People—An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and Machines*, 28(4), 689–707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>
- [6] Grote, T., & Berens, P. (2020). On the ethics of algorithmic decision-making in healthcare. *Journal of Medical Ethics*, 46(3), 205–211. <https://doi.org/10.1136/medethics-2019-105586>
- [7] London, A. J. (2019). Artificial intelligence and black-box medical decisions: Accuracy versus explainability. *Hastings Center Report*, 49(1), 15–21. <https://doi.org/10.1002/hast.973>
- [8] Obermeyer, Z., Powers, B., Vogeli, C., & Mullainathan, S. (2019). Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science*, 366(6464), 447–453. <https://doi.org/10.1126/science.aax2342>
- [9] Raji, I. D., Smart, A., White, R. N., Mitchell, M., Gebru, T., Hutchinson, B., ... Barnes, P. (2020). Closing the AI accountability gap: Defining an end-to-end framework for internal algorithmic auditing. *Proceedings of the 2020 Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 33–44. <https://doi.org/10.1145/3351095.3372873>
- [10] Topol, E. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44–56. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>
- [11] World Health Organization. (2021). *Ethics and governance of artificial intelligence for health*. World Health Organization.

YAŞLI BİREYLERDE AROMATERAPİ KULLANIMI VE RUH SAĞLIĞI

Döne GÜNAY
Sivas İl Sağlık Müdürlüğü
donegunay@gmail.com 0000-0002-8721-6028

Sevda UZUN
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
sevdauzun@ahievran.edu.tr 0000-0002-5954-717X,

Özet

Yaşlanma süreci, bireyin biyolojik, psikolojik ve sosyal boyutlarda çok yönlü değişimler yaşadığı dinamik bir dönemdir. Artan yaşam süresiyle birlikte kronik hastalıkların görülme sıklığı artmakta; buna paralel olarak uyku bozuklukları, anksiyete, depresif belirtiler, bilişsel gerileme, yalnızlık ve yaşam kalitesinde azalma gibi ruh sağlığını etkileyen sorunlar daha belirgin hale gelmektedir. Yaşlı bireylerde psikiyatrik semptomların yönetiminde farmakolojik tedaviler sıklıkla kullanılmakla birlikte, polifarmasi, ilaç etkileşimleri ve advers etkiler önemli klinik riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle güvenli, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir non-farmakolojik yaklaşımlara yönelik ilgi giderek artmaktadır.

Aromaterapi, bitkilerden elde edilen uçucu yağların inhalasyon, difüzyon veya topikal uygulama yoluyla kullanılması esasına dayanan tamamlayıcı bir uygulamadır. Mekanizma olarak, koku uyaranlarının limbik sistem üzerinden duygu durumu, stres yanıtı ve otonom sinir sistemi aktivitesi üzerinde etkili olabileceği öne sürülmektedir. Güncel araştırmalar, özellikle lavanta ve biberiye gibi uçucu yağların yaşlı bireylerde uyku kalitesini artırabildiğini, anksiyete ve stres düzeylerini azaltabildiğini ve bazı bilişsel işlevler üzerinde olumlu etkiler gösterebildiğini bildirmektedir. Randomize kontrollü çalışmalar ve meta-analizler, aromaterapinin uyku parametrelerinde anlamlı iyileşmeler sağlayabildiğini; palyatif bakım hastalarında ağrı ve kaygıyı azaltmada destekleyici rol üstlenebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca demanslı yaşlı bireylerde davranışsal ve psikolojik semptomların yönetiminde non-farmakolojik girişimler arasında yer aldığı belirtilmektedir.

Bununla birlikte, mevcut çalışmaların örneklem büyüklüklerinin sınırlı olması, uygulama süreleri ve doz farklılıkları ile metodolojik heterojenite gibi faktörler nedeniyle daha güçlü, standartlaştırılmış ve uzun dönemli araştırmalara gereksinim bulunmaktadır. Tüm bu bulgular ışığında aromaterapi, yaşlı bireylerde ruh sağlığının desteklenmesinde bütüncül bakım anlayışı içinde değerlendirilebilecek tamamlayıcı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, yaşlı bireylerde aromaterapi kullanımının ruh sağlığı üzerindeki etkilerini güncel literatür doğrultusunda kapsamlı bir çerçevede ele almayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aromaterapi, Yaşlılık, Ruh sağlığı, Non-farmakolojik girişimler, Geriatri.

USE OF AROMATHERAPY in OLDER ADULTS AND MENTAL HEALTH**Abstract**

The ageing process is a dynamic period in which individuals experience multidimensional biological, psychological, and social changes. With increasing life expectancy, the prevalence of chronic diseases rises; consequently, mental health–related problems such as sleep disturbances, anxiety, depressive symptoms, cognitive decline, loneliness, and decreased quality of life become more pronounced in older adults. Although pharmacological treatments are frequently used in the management of psychiatric symptoms in this population, polypharmacy, drug interactions, and adverse effects pose significant clinical risks. Therefore, there is a growing interest in safe, low-cost, and easily applicable non-pharmacological approaches.

Aromatherapy is a complementary practice based on the use of essential oils derived from plants through inhalation, diffusion, or topical application. Mechanistically, olfactory stimuli are suggested to influence mood, stress responses, and autonomic nervous system activity via the limbic system. Current research indicates that essential oils, particularly lavender and rosemary, may improve sleep quality, reduce anxiety and stress levels, and positively affect certain cognitive functions in older adults. Randomized controlled trials and meta-analyses demonstrate that aromatherapy can lead to significant improvements in sleep parameters and may serve as a supportive intervention in reducing pain and anxiety among patients receiving palliative care. Additionally, it is reported to be among the non-pharmacological interventions used in managing behavioral and psychological symptoms in older adults with dementia.

However, limitations such as small sample sizes, variations in intervention duration and dosage, and methodological heterogeneity highlight the need for more robust, standardized, and long-term studies. In light of these findings, aromatherapy emerges as a complementary approach that can be integrated into holistic care models to support mental health in older adults. This study aims to comprehensively examine the effects of aromatherapy use on mental health in older adults in accordance with current literature.

Keywords

Aromatherapy; Ageing; Mental health; Non-pharmacological interventions; Geriatrics.

Giriş

Yaşlanma süreci, bireylerin biyolojik işlevlerinin yanı sıra psikolojik ve sosyal uyumlarını da etkileyen çok boyutlu bir dönemdir. Dünya Sağlık Örgütü, sağlıklı yaşlanma kavramını yalnızca hastalıkların yokluğu ile değil, bireyin ileri yaşlarda fiziksel ve ruhsal işlevselliğini sürdürebilmesi ile ilişkilendirmekte ve ruh sağlığını bu sürecin temel bileşenlerinden biri olarak tanımlamaktadır (World Health Organization [WHO], 2023). Ruh sağlığının korunması, yaşlı

bireylerin yaşam kalitesi, bağımsızlık düzeyi ve bakım süreçlerine uyumu açısından kritik öneme sahiptir.

Yaşlılık döneminde anksiyete, depresyon, stres ve özellikle uyku bozuklukları gibi ruhsal sorunların görülme sıklığının arttığı bildirilmektedir (World Health Organization [WHO], 2023; Her & Cho, 2021; Xu et al., 2024). Kronik hastalıkların yaygınlığı, fonksiyonel kısıtlılıklar, bilişsel değişimler ve sosyal izolasyon bu ruhsal sorunların ortaya çıkmasını kolaylaştıran başlıca faktörler arasında yer almaktadır. American Geriatrics Society, yaşlı bireylerde ruhsal belirtilerin yönetiminde farmakolojik olmayan yaklaşımların önemine dikkat çekmekte ve bütüncül bakım anlayışını önermektedir (American Geriatrics Society, 2024).

Farmakolojik tedaviler yaşlı bireylerde ruhsal sorunların yönetiminde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, polifarmasi, ilaç etkileşimleri ve yan etki riskleri önemli bir sorun alanı oluşturmaktadır. Bu durum, yaşlı bakımında non-farmakolojik ve tamamlayıcı yaklaşımlara olan ilgiyi artırmaktadır (Abraha et al., 2017). Tamamlayıcı yaklaşımlar, yaşlı bireylerin ruhsal belirtilerinin hafifletilmesi ve yaşam kalitesinin artırılmasında destekleyici bir rol üstlenmektedir.

Aromaterapi, bitkilerden elde edilen uçucu yağların inhalasyon, masaj veya topikal uygulama yoluyla kullanıldığı tamamlayıcı bir bakım yaklaşımıdır. Uçucu yağların koku alma sistemi aracılığıyla limbik sistemi etkilemesi, stres yanıtının azalmasına ve duygusal dengeye katkı sağlamaktadır. Literatürde aromaterapinin anksiyete, stres ve uyku sorunları üzerindeki olumlu etkileri giderek daha fazla vurgulanmaktadır (Her & Cho, 2021; Xu et al., 2024). Ayrıca yaşlı kadınlarda görülen duygu durum dalgalanmaları ve uyku sorunlarının yönetiminde de aromaterapinin destekleyici bir yöntem olabileceği bildirilmektedir (Smith-Francis, 2024).

Yaşlı bireylerde aromaterapi uygulamalarının invaziv olmaması, kolay uygulanabilir olması ve bakım ortamlarına entegre edilebilmesi önemli avantajlar sunmaktadır. Huzurevleri, palyatif bakım üniteleri ve evde bakım hizmetlerinde aromaterapi uygulamalarının yaygınlaşması, bu yaklaşımın yaşlı bakımında tamamlayıcı bir rol üstlendiğini göstermektedir (Faydalı & Çetinkaya, 2018). Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı yaşlı bireylerde aromaterapi kullanımını ve ruh sağlığı üzerindeki etkilerini literatür doğrultusunda incelemektir.

Yaşlı Bireylerde Ruh Sağlığı ve Tamamlayıcı Yaklaşımlar

Ruh sağlığı, yaşlı bireylerin günlük yaşam aktivitelerini sürdürebilmeleri, sosyal ilişkilerini devam ettirebilmeleri ve yaşam doyumlarını koruyabilmeleri açısından temel bir belirleyicidir. Ruhsal sorunların fiziksel hastalıkların seyrini olumsuz etkileyebildiği ve bakım gereksinimini artırdığı bildirilmektedir (WHO, 2023). Bu nedenle yaşlı bakımında bütüncül yaklaşım benimsenmesi önem taşımaktadır. Tamamlayıcı ve destekleyici uygulamalar, yaşlı bireylerin ruhsal belirtilerinin hafifletilmesi ve yaşam kalitesinin artırılmasında giderek daha fazla tercih edilmektedir. Aromaterapi, farmakolojik olmayan bir yöntem olması nedeniyle güvenli ve kabul edilebilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (American Geriatrics Society, 2024).

Aromaterapinin Ruh Sağlığı Üzerine Etkileri

Literatürde aromaterapinin yaşlı bireylerde anksiyete ve stres düzeylerini azaltmada etkili olduğu bildirilmektedir (Akbaş Uysal et al., 2024; Can et al., 2024). Palyatif bakım hastalarıyla yapılan çalışmalarda aromaterapi uygulamalarının anksiyete ve stres düzeylerini anlamlı biçimde azalttığı gösterilmiştir (Akbaş Uysal et al., 2024). Diyabetli yaşlı bireylerde lavanta ve biberiye aromaterapisinin anksiyete düzeyini düşürdüğü de bildirilmektedir (Can et al., 2024). Uyku kalitesi, ruh sağlığının temel bileşenlerinden biridir ve yaşlılık döneminde sıklıkla bozulmaktadır. Sistematik derlemeler ve meta-analizler, aromaterapinin yaşlı bireylerde uyku kalitesini artırdığını ortaya koymaktadır (Her & Cho, 2021; Xu et al., 2024). Huzurevinde yaşayan yaşlı bireylerde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Faydalı & Çetinkaya, 2018).

Aromaterapinin ruhsal etkilerinin yalnızca bakım alan bireylerle sınırlı olmadığı, yaşlı bireylere bakım verenlerde stres, yük ve yorgunluk düzeylerini azaltabildiği de gösterilmiştir (Castro et al., 2024). Bu durum, aromaterapinin yaşlı bakımında daha geniş bir psikososyal etki alanına sahip olduğunu düşündürmektedir. Sağlık bakım profesyonelleri, yaşlı bireylerin bütüncül bakımında aromaterapi gibi tamamlayıcı uygulamaların planlanması ve güvenli biçimde uygulanmasında önemli bir role sahiptir. Aromaterapi uygulamalarının bireyin tercihleri, mevcut sağlık durumu ve olası riskler dikkate alınarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Karadağ et al., 2021). Ayrıca aromaterapinin bakım süreçlerinde konfor ve rahatlama sağlaması, yaşlı bireylerin bakım deneyimini olumlu yönde etkileyebilmektedir (Lafcı & Kaşıkçı, 2023).

Sonuç

Literatür bulguları, aromaterapinin yaşlı bireylerde ruh sağlığını desteklemede güvenli ve tamamlayıcı bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Aromaterapi uygulamalarının anksiyete ve stres düzeylerini azalttığı, uyku kalitesini artırdığı ve genel ruhsal iyilik hâlini desteklediği bildirilmektedir. Yaşlı bakımında bütüncül yaklaşımın güçlendirilmesi açısından aromaterapinin hemşirelik bakımına entegrasyonu önem taşımaktadır.

Kaynakça

Abraha, I., Rimland, J. M., Trotta, F. M., Dell'Aquila, G., Cruz-Jentoft, A., Petrovic, M., Gudmundsson, A., Soiza, R., O'Mahony, D., Guaita, A., & Cherubini, A. (2017). Systematic review of systematic reviews of non-pharmacological interventions to treat behavioural disturbances in older patients with dementia: The SENATOR-OnTop series. *BMJ Open*, 7(3), e012759. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2016-012759>

Akbaş Uysal, D., Şenuzun Aykar, F., & Uyar, M. (2024). The effects of aromatherapy and music on pain, anxiety, and stress levels in palliative care patients. *Supportive Care in Cancer*, 32(10), 632. <https://doi.org/10.1007/s00520-024-08837-0>

American Geriatrics Society. (2024). *American Geriatrics Society*.
<https://www.americangeriatrics.org/>

Can, S., Yildirim Usta, Y., Yildiz, S., & Tayfun, K. (2024). The effect of lavender and rosemary aromatherapy application on cognitive functions, anxiety, and sleep quality in the elderly with diabetes. *Explore*, 20(6), 103033. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2024.103033>

Castro, M. F., Turrini, R. N. T., Hashimoto, T. H. F., Sichieri, K., Tartarotti, A. O., Faria, M. F. O., & Gnatta, J. R. (2024). Effects of aromatherapy on the overload and fatigue of informal elderly caregivers: A pilot study. *Revista Gaúcha de Enfermagem*, 45(spe1), e20240011. <https://doi.org/10.1590/1983-1447.2024.20240011.en>

Faydalı, S., & Çetinkaya, F. (2018). The effect of aromatherapy on sleep quality of elderly people residing in a nursing home. *Holistic Nursing Practice*, 32(1), 8–16. <https://doi.org/10.1097/HNP.0000000000000244>

Her, J., & Cho, M. K. (2021). Effect of aromatherapy on sleep quality of adults and elderly people: A systematic literature review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, 60, 102739. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2021.102739>

Karadağ, S., Akça, N. K., Çürük, G. N., & Kaplan, A. (2021). The effect of aromatherapy on elderly persons with dry skin: A randomized controlled trial. *Holistic Nursing Practice*, 35(1), 34–39. <https://doi.org/10.1097/HNP.0000000000000420>

Lafcı, D., & Kaşıkçı, M. (2023). The effect of aroma massage on constipation in elderly individuals. *Experimental Gerontology*, 171, 112023. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2022.112023>

Smith-Francis, M. J. (2024). Complementary and alternative medicine for menopause. *Nursing Clinics of North America*, 59(4), 551–562. <https://doi.org/10.1016/j.cnur.2024.08.001>

World Health Organization. (2023). *Ageing and health*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>

Xu, K., Wang, S., Ji, Q., Ni, Y., & Liu, T. (2024). Effects of aromatherapy on sleep quality in older adults: A meta-analysis. *Medicine*, 103(49), e40688. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000040688>

DİYABETTE REİKİ KULLANIMI VE RUH SAĞLIĞI

Döne GÜNAY^{1*}, Sevda UZUN²

^{*1} Sivas İl Sağlık Müdürlüğü, Sivas, Türkiye,
donegunay@gmail.com 0000-0002-8721-6028, Tel: 555 991 30 93

² Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye,
sevdauzun@ahievran.edu.tr 0000-0002-5954-717X, Tel: 506 992 56 71

Özet

Diyabet, hem fiziksel hem de psikolojik sağlık üzerinde uzun süreli etkiler yaratan kronik bir metabolik hastalıktır ve milyonlarca bireyin yaşamını doğrudan etkilemektedir. Hastalığın yönetimi, kan şekeri kontrolü, düzenli ilaç kullanımı ve yaşam tarzı değişiklikleri gerektirmektedir. Bu bakım içeriği ve sürekli öz yönetim gerekliliği, diyabetli bireylerde stres, kaygı ve depresyon gibi psikososyal sorunların ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Psikolojik sorunlar, bireylerin günlük yaşam aktivitelerini ve hastalıkla baş etme becerilerini olumsuz etkileyerek, tedaviye uyumu zorlaştırmakta ve yaşam kalitesini düşürmektedir. Son yıllarda, diyabetli bireyler arasında tamamlayıcı ve alternatif terapiler, özellikle stresin azaltılması ve psikolojik iyilik hâlinin desteklenmesi amacıyla giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Reiki, Japon kökenli, enerji temelli bir uygulama olarak, bireyin enerji dengesini desteklemeyi ve hem fiziksel hem de psikolojik iyilik hâlini artırmayı amaçlamaktadır. Reiki seansları, gevşeme sağlayarak kaygı ve stres düzeylerini azaltabilir, depresyon belirtilerini hafifletebilir ve genel yaşam kalitesinin iyileşmesine katkı sağlayabilir. Hemşirelik bakımında Reiki'nin non-invaziv, güvenli ve kolay uygulanabilir bir tamamlayıcı yöntem olması, bütüncül bakım yaklaşımıyla uyumlu bir destek sunar ve bireylerin öz bakım davranışlarını güçlendirebilir. Bununla birlikte, mevcut uygulama ve araştırmaların çoğu küçük örneklem grupları ile sınırlıdır ve metodolojik çeşitlilik göstermektedir. Bu nedenle, Reiki'nin diyabetli bireylerdeki fizyolojik ve psikolojik etkilerini daha güvenilir biçimde değerlendirecek kapsamlı ve sistematik araştırmalara ihtiyaç vardır.

Bu derleme, Reiki'nin diyabet yönetimindeki potansiyel etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla ele almayı, hem klinik uygulamalara hem de hemşirelik araştırmalarına yol göstermeyi hedeflemektedir. Reiki'nin stres yönetimi, psikolojik destek ve yaşam kalitesini artırma potansiyeli, diyabet bakımında önemli bir tamamlayıcı yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Diyabet, Reiki, Ruh Sağlığı.

THE USE OF REIKI IN DIABETES AND MENTAL HEALTH

Abstract

Diabetes is a chronic metabolic disease that has long-term effects on both physical and psychological health, directly impacting the lives of millions of individuals worldwide. Its management requires continuous self-care, blood glucose monitoring, regular medication adherence, and lifestyle adjustments. These ongoing demands can lead to significant psychosocial challenges, including stress, anxiety, and depression. Such psychological burdens may impair daily functioning, reduce coping abilities, hinder treatment adherence, and ultimately decrease quality of life. In recent years, complementary and alternative therapies have gained increasing attention among individuals with diabetes, particularly for stress reduction and enhancement of overall psychological well-being.

Reiki, a Japanese-origin energy-based therapy, aims to support the body's energy balance and promote both physical and psychological well-being. Reiki sessions may induce relaxation, reduce stress and anxiety levels, alleviate symptoms of depression, and improve overall quality of life. In nursing care, Reiki represents a non-invasive, safe, and easily applicable complementary approach that aligns with holistic care principles and may strengthen patients' self-care behaviors. However, most current studies and practical applications are limited to small sample sizes and exhibit methodological variability. Therefore, there is a need for comprehensive and systematic research to more reliably evaluate the physiological and psychological effects of Reiki in individuals with diabetes.

This review aims to examine the potential effects of Reiki on diabetes management from a holistic perspective, providing guidance for both clinical practice and nursing research. The therapy's capacity to enhance stress management, provide psychological support, and improve quality of life positions Reiki as a valuable complementary approach in the care of individuals with diabetes.

Keywords: Diabetes mellitus, Reiki, Mental Health.

Giriş

Diyabet, dünya genelinde yaygın olarak görülen kronik bir metabolik hastalık olup, hem fiziksel hem de psikolojik sağlık üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır (International Diabetes Federation, 2025). Diyabetli bireylerde yalnızca kan şekeri kontrolü değil, aynı zamanda stres, anksiyete ve depresyon gibi ruhsal sorunlar da sık görülmektedir (Garrow & Egede, 2006). Bu psikososyal etkiler, hastalığın yönetimini zorlaştırmakta ve yaşam kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir (International Diabetes Federation, 2025).

Tamamlayıcı ve alternatif terapiler, özellikle stres ve anksiyete yönetiminde, diyabetli bireyler arasında giderek daha fazla tercih edilmektedir (Garrow & Egede, 2006). Reiki, bu terapiler arasında enerjiyi dengeleyerek vücudun kendi kendini iyileştirme kapasitesini artırmayı

amaçlayan bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Çoşar, Yüce, Atik, Karatepe, & Erdoğan, 2017; Özsezer Kaymak, Ataç, & Tekir, 2022). Literatürde, Reiki'nin fiziksel ve psikolojik sağlık üzerindeki etkilerine ilişkin çalışmalar giderek artmaktadır; bu bağlamda diyabetli bireylerde Reiki'nin potansiyel faydalarının araştırılması, hem klinik uygulamalar hem de hemşirelik uygulamaları açısından önem taşımaktadır (Lee, Pittler, & Ernst, 2008; Thrane & Cohen, 2014).

Bu bildiri, diyabetli bireylerde Reiki uygulamalarının ruh sağlığı ve yaşam kalitesi üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, Reiki'nin temel prensipleri, diyabet yönetimindeki rolü ve psikolojik faydaları literatür ışığında incelenecektir.

Reiki: Tanım ve Temel Prensipler

Reiki, Japon kökenli bir enerji terapisi yöntemi olarak tanımlanmakta ve uygulayıcının elleri aracılığıyla, bireyin vücudundaki enerji akışını dengelemeyi amaçlamaktadır (Çoşar, Yüce, Atik, Karatepe, & Erdoğan, 2017). Bu yöntem, bedenin kendi kendini iyileştirme kapasitesini destekleyerek, fiziksel ve psikolojik iyilik hâlini artırmayı hedefler (Özsezer Kaymak, Ataç, & Tekir, 2022). Reiki uygulamaları genellikle dokunma veya ellerin hafif şekilde vücut üzerinde tutulması şeklinde gerçekleştirilir; bu süreçte enerji kanallarının dengelenmesi ve kişinin stres düzeylerinin azalması hedeflenir (Lee, Pittler, & Ernst, 2008).

Enerji terapileri arasında yer alan Reiki, yalnızca fiziksel sağlık sorunlarına değil, aynı zamanda ruhsal sağlık sorunlarına da katkı sağlayabileceği öne sürülen bir yöntemdir (Özsezer Kaymak, Ataç, & Tekir, 2022). Reiki'nin temel ilkeleri, kişinin kendisine ve çevresine karşı şefkatli olması, yaşam enerjisini dengelemesi ve zihinsel sakinliği desteklemesidir (Çoşar, Yüce, Atik, Karatepe, & Erdoğan, 2017). Hemşirelik uygulamalarında Reiki, hasta bakımında tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmakta ve özellikle stres, anksiyete ve ağrı yönetiminde destekleyici rol üstlenmektedir (Lee, Pittler, & Ernst, 2008; Thrane & Cohen, 2014; Pocotte & Salvador, 2008).

Reiki'nin uygulanma süreci, basit ve non-invaziv olması nedeniyle farklı yaş grupları ve kronik hastalık durumlarında güvenle uygulanabilmektedir. Bu yönüyle hemşirelikte ve tamamlayıcı terapi uygulamalarında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Özsezer Kaymak, Ataç, & Tekir, 2022; Doğan & İster, 2023).

Diyabet Yönetiminde Reiki Kullanımı

Diyabet, kronik bir metabolik hastalık olarak hem fizyolojik hem de psikolojik açıdan birey üzerinde ağır bir yük oluşturmaktadır (International Diabetes Federation, 2025). Bu nedenle, diyabetli bireylerin tedavi ve yaşam kalitesini iyileştirmeye yönelik tamamlayıcı terapiler, giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Garrow & Egede, 2006). Reiki, diyabet yönetiminde hem doğrudan fizyolojik etkiler hem de psikososyal destek sağlama potansiyeli ile dikkat çeken bir uygulamadır (Çoşar, Yüce, Atik, Karatepe, & Erdoğan, 2017).

Literatür, Reiki uygulamalarının diyabetli bireylerde bazı fizyolojik faydalar sağlayabileceğini göstermektedir. Özellikle diyabetik nöropati gibi ağrı ve rahatsızlık yaratan komplikasyonlarda, Reiki ve refleksoloji uygulamalarının hastaların yaşam kalitesini artırdığı ve ağrı düzeylerini azalttığı bildirilmektedir (Rana Korkunç, 2025; Çiçek, Demir, Yılmaz, & Yıldız, 2021). Bu bulgular, Reiki'nin ağrı yönetiminde tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılabileceğini ve hastaların günlük yaşam aktivitelerine katılımını destekleyebileceğini ortaya koymaktadır (Hartemann et al., 2011).

Bunun yanı sıra, Reiki'nin diyabet yönetiminde dolaylı etkileri de bulunmaktadır. Stres ve kaygı düzeylerinin azalması, bireylerin tedaviye uyumunu ve kan şekeri kontrolünü dolaylı olarak olumlu yönde etkileyebilir (Lee, Pittler, & Ernst, 2008; Thrane & Cohen, 2014). Reiki, uygulama sırasında vücut ve zihin üzerindeki rahatlatıcı etkisi sayesinde, kronik hastalıklarla başa çıkmayı kolaylaştırmakta ve hastaların genel yaşam kalitesini iyileştirmektedir (Çoşar, Yüce, Atik, Karatepe, & Erdoğan, 2017; Özsezer Kaymak, Ataç, & Tekir, 2022).

Bu bağlamda, Reiki, diyabetli bireylerde hem fiziksel hem de psikolojik sağlık üzerindeki etkileri ile tamamlayıcı ve bütüncül bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Ancak, uygulamanın etkinliği konusunda literatürdeki çalışmaların çoğunluğu küçük örneklem grupları ve farklı metodolojiler içermekte olduğundan, geniş kapsamlı randomize kontrollü çalışmaların yapılması gerekmektedir (Lee, Pittler, & Ernst, 2008; Thrane & Cohen, 2014).

Ruh Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Diyabetli bireylerde ruh sağlığı sorunları, hastalığın yönetimi ve yaşam kalitesi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (International Diabetes Federation, 2025). Stres, anksiyete ve depresyon, diyabetin hem fizyolojik kontrolünü zorlaştırmakta hem de bireylerin tedaviye uyumunu olumsuz yönde etkilemektedir (Garrow & Egede, 2006). Bu nedenle, Reiki gibi tamamlayıcı terapiler, diyabetli bireylerde psikolojik destek sağlama açısından önem kazanmaktadır (Çoşar, Yüce, Atik, Karatepe, & Erdoğan, 2017).

Araştırmalar, Reiki uygulamalarının stres ve kaygıyı azaltarak bireylerin ruhsal iyilik hâlini destekleyebileceğini göstermektedir. Thrane ve Cohen (2014), randomize kontrollü çalışmaların sistematik bir incelemesinde, Reiki'nin yetişkinlerde kaygı ve ağrı düzeylerini anlamlı şekilde azalttığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, Erdoğan ve Çınar (2016) tarafından yapılan çalışmada, huzurevinde yaşayan yaşlı bireylerde Reiki uygulamasının depresyon düzeylerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu bulgular, Reiki'nin yalnızca fiziksel değil, psikolojik sağlık üzerinde de pozitif etkiler sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Hemşirelik uygulamaları bağlamında, Reiki'nin psikososyal destek aracı olarak kullanımı da literatürde öne çıkmaktadır (Pocotte & Salvador, 2008; Doğan & İster, 2023). Reiki uygulamaları sırasında bireylerin zihinsel ve bedensel rahatlama deneyimlemeleri, stresin azaltılmasına ve psikolojik iyilik hâlinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle kronik hastalık yönetiminde, Reiki'nin bu yönü, hastaların yaşam kalitesini destekleyen önemli bir

tamamlayıcı yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Çoşar, Yüce, Atik, Karatepe, & Erdoğan, 2017; Özsezer Kaymak, Ataç, & Tekir, 2022).

Sonuç olarak, Reiki uygulamaları, diyabetli bireylerde ruh sağlığını destekleyici, kaygı ve depresyonu azaltıcı ve psikolojik dayanıklılığı artırıcı bir yöntem olarak literatürde yer almaktadır. Ancak, bu etkinin daha net ve güçlü bir şekilde ortaya konabilmesi için daha büyük örneklem gruplarıyla yapılan randomize kontrollü çalışmaların gerekliliği vurgulanmaktadır (Thrane & Cohen, 2014; Erdoğan & Çınar, 2016).

Sonuç ve Öneriler

Bu derleme, diyabetli bireylerde Reiki uygulamalarının hem fizyolojik hem de psikolojik etkilerini değerlendirmiştir. Literatür, Reiki'nin diyabet yönetiminde ağrı kontrolü, stres azaltma ve genel yaşam kalitesini artırma gibi potansiyel faydalar sağladığını göstermektedir (Lee, Pittler, & Ernst, 2008; Çiçek, Demir, Yılmaz, & Yıldız, 2021; Rana Korkunç, 2025). Ayrıca, Reiki uygulamalarının ruh sağlığı üzerinde olumlu etkileri olduğu; kaygı ve depresyon düzeylerini azalttığı ve psikolojik iyilik hâlini desteklediği bildirilmiştir (Thrane & Cohen, 2014; Erdoğan & Çınar, 2016; Pocotte & Salvador, 2008).

Hemşirelik uygulamaları açısından Reiki, tamamlayıcı bir yöntem olarak bireylerin stres ve kaygı yönetiminde, ağrı kontrolünde ve yaşam kalitesinin artırılmasında etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir (Çoşar, Yüce, Atik, Karatepe, & Erdoğan, 2017; Özsezer Kaymak, Ataç, & Tekir, 2022; Doğan & İster, 2023). Reiki'nin non-invaziv ve uygulanması kolay bir yöntem olması, farklı yaş grupları ve kronik hastalıklar için uygun bir tamamlayıcı terapi olarak önemini artırmaktadır.

Buna karşın, Reiki'nin etkinliği konusunda literatürdeki çalışmaların çoğu küçük örneklem gruplarıyla yapılmış ve metodolojik farklılıklar içermektedir. Bu nedenle, diyabetli bireylerde Reiki uygulamalarının etkinliğini daha güçlü ve güvenilir şekilde değerlendirmek için geniş kapsamlı randomize kontrollü çalışmaların yapılması önerilmektedir (Lee, Pittler, & Ernst, 2008; Thrane & Cohen, 2014).

Sonuç olarak, Reiki, diyabet yönetiminde ve ruh sağlığının desteklenmesinde potansiyel bir tamamlayıcı terapi olarak öne çıkmaktadır. Klinik uygulamalarda ve hemşirelik bakımında Reiki'nin sistematik olarak uygulanması, diyabetli bireylerin yaşam kalitesini artırabilir ve psikolojik iyilik hâllerini güçlendirebilir. Gelecek araştırmaların, Reiki'nin etkilerini uzun dönem takipleri ile değerlendirmesi, uygulama protokollerinin standartlaştırılması ve farklı diyabet komplikasyonlarına olan etkilerini incelemesi önemlidir.

KAYNAKÇA

Çiçek, S. C., Demir, S., Yılmaz, D., & Yıldız, S. (2021). Effect of reflexology on ankle brachial index, diabetic peripheral neuropathy, and glycemic control in older adults with diabetes: A randomized controlled trial. *Complementary Therapies in Clinical Practice*, 44, 101437. <https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2021.101437>

Çoşar, A. A., Yüce, U. Ö., Atik, D., Karatepe, H., & Erdoğan, Z. (2017). Reiki and diabetes: Review. *Acta Medica Alanya*, 1(2), 49–53. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/325394>

Doğan, H. D., & İster, E. D. (2023). Türkiye’de reiki uygulanarak yapılan hemşirelik tezlerinin incelenmesi. *İstanbul Rumeli Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 2(1), 59–74. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3215291>

Erdoğan, Z., & Çınar, S. (2016). The effect of Reiki on depression in elderly people living in nursing homes. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 15(1), 35–40. <http://journal.acibadem.edu.tr/en/pub/issue/61302/914283>

Garrow, D., & Egede, L. E. (2006). National patterns and correlates of complementary and alternative medicine use in adults with diabetes. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 12(9), 895–902. <https://doi.org/10.1089/acm.2006.12.895>

Hartemann, A., Attal, N., Bouhassira, D., Dumont, I., Gin, H., Jeanne, S., ... Richard, J. L. (2011). Painful diabetic neuropathy: Diagnosis and management. *Diabetes & Metabolism*, 37(5), 377–388. <https://doi.org/10.1016/j.diabet.2011.06.003>

Lee, M. S., Pittler, M. H., & Ernst, E. (2008). Effects of Reiki in clinical practice: A systematic review of randomized clinical trials. *International Journal of Clinical Practice*, 62(6), 947–954. <https://doi.org/10.1111/j.1742-1241.2008.01729.x>

Özsezer Kaymak, G., Ataç, M., & Tekir, Ö. (2022). Hemşirelikte tamamlayıcı terapiler: Renklerle sanatsal tedavi, çakralar ve reiki. *Jaren*, 8(3), 177–186.

Pocotte, S. L., & Salvador, D. (2008). Reiki as a rehabilitative nursing intervention for pain management: A case study. *Rehabilitation Nursing*, 33(6), 231–232.

Rana Korkunç. (2025, November 28). Diyabetik nöropati ağrısında reiki ve refleksoloji masajı uygulamasının hastanın yaşam kalitesi ve ağrı düzeyine etkisi. <https://ranakorkunc.com/2025/11/28/diyabetik-noropati-agrisinda-reiki-ve-refleksoloji-masaji-uygulamasinin-hastanin-yasam-kalitesi-ve-agri-duzeyine-etkisi/>

Thrane, S., & Cohen, S. M. (2014). Effect of Reiki therapy on pain and anxiety in adults: An in-depth literature review of randomized trials with effect size calculations. *Pain Management Nursing*, 15(4), 897–908. <https://doi.org/10.1016/j.pmn.2013.07.008>

International Diabetes Federation. (2025). *IDF diabetes atlas* (11th ed.).
<https://diabetesatlas.org/resources/idf-diabetes-atlas-2025/>

TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MATERYAL (PCM) KULLANIMI

Arş. Gör. Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM

Iğdır Üniversitesi, kaan.kucukerdem@igdir.edu.tr-ORCID ID: 0000-0002-1593-4725

Dr. Öğr. Üyesi Ümran ATAY

Mardin Artuklu Üniversitesi, umranatay@artuklu.edu.tr-ORCID ID: 0000-0002-2248-4582

Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

Çukurova Üniversitesi, hhozturk@cu.edu.tr-ORCID ID: 0000-0001-6904-5539

ÖZET

Tarımsal yapılarda faz değiştiren materyaller (PCM) kullanmak, binaların ısı performansını ve enerji verimliliğini artırır. Tarımsal yapıların değişen enerji taleplerinin daha iyi yönetilmesini sağlar. Bu çalışmada, PCM'nin bina malzemelerine entegrasyonuna odaklanan deneysel, sayısal ve hibrit çalışmadan elde edilen bulgular incelenmiş, erime sıcaklığı, gizli ısı, ısı iletkenlik, katman kalınlığı ve iklim uygunluğu gibi PCM performansını etkileyen temel değişkenler değerlendirilmiş, duvarlar, çatılar, zeminler ve tavanlar gibi çeşitli bina bileşenleri arasında PCM yerleştirme yöntemleri (iç, orta ve dış) karşılaştırılmış, çeşitli iklim bölgelerinde ve farklı bina yönelimlerinde PCM'lerin etkinliği değerlendirilmiş ve enerji açısından verimli uygulamaları desteklemek için nicel sonuçlara dayalı pratik tasarım önerileri derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tarımsal yapılar, İklimlendirme, Faz değiştiren materyal (PCM)

1. GİRİŞ

Binalar ve altyapı tesisleri, enerji tüketiminde ve sera gazlarının (GHG) atmosfere salınmasında önemli bir rol oynar. İklim değişikliğine olan etkileri azaltmak için enerji tasarrufuna artan ilgi ile inşaat sektöründe, bina verimliliğini iyileştirme yöntemlerine giderek daha fazla öncelik verilmektedir. Tarımsal yapılar; boyutları, yüksek doluluk oranları ve ısıtma, havalandırma ve klima (HVAC) sistemlerine bağımlılıkları nedeniyle yoğun olarak enerji tüketilen binalar arasında yer alır. Bu yapıların çoğu, kışın önemli ısı kaybına, yazın ise ısı kazanımına yol açabilen ısıl olarak iletken malzemelerden yapılmış kalın duvarlara sahiptir. Faz değiştiren materyaller (PCM), tarımsal yapılarda ısıl düzenlemeyi iyileştirmek ve ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmak için etkin çözümlerden birisidir. PCM'ler, yüksek enerji üretilen dönemlerde fazla ısı enerjisini depolar ve yüksek talep zamanlarında serbest bırakarak, aşırı enerji yüklerini azaltmaya ve arzı tüketimle dengelemeye yardımcı olur. Ayrıca, PCM'ler, iç ortam sıcaklıklarını pasif olarak düzenleyerek enerji verimliliğini artırır ve ısıl konforu iyileştirir, aktif ısıtma ve soğutma sistemlerine olan bağımlılığı azaltır. Bu durum, enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltır. Bu nedenle, tarımsal yapılarda PCM kullanmak, binaların ısıl performansını ve enerji verimliliğini artırır. Faz değiştiren materyaller (PCM), tarımsal yapılarda ısıl düzenlemeyi iyileştirmek ve ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmak için

etkin çözümlerden birisidir. PCM’ler, yüksek enerji üretilen dönemlerde fazla ısı enerjisini depolar ve yüksek talep zamanlarında serbest bırakarak, aşırı enerji yüklerini azaltmaya ve arzı tüketimle dengelemeye yardımcı olur. Ayrıca, PCM’ler, iç ortam sıcaklıklarını pasif olarak düzenleyerek enerji verimliliğini artırır ve ısıl konforu iyileştirir, aktif ısıtma ve soğutma sistemlerine olan bağımlılığı azaltır. Bu durum, enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltır. Bu nedenle, tarımsal yapılarda PCM kullanmak, binaların ısıl performansını ve enerji verimliliğini artırır.

2. FAZ DEĞİŞTİREN MATERYALLER

Faz değiştiren materyallerin (PCM) türü ve entegrasyon yöntemleri, belirli bir uygulamada optimum etkinlik için istenen özelliklerle uyumlu olacak şekilde dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Bu özellikler erime sıcaklığı, gizli ısı kapasitesi, özgül ısı ve ısıl iletkenlik gibi ısıl özelliklerdir. PCM’lerin birincil özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Bina Uygulamalarında Kullanılan Farklı Faz Değiştiren Materyallerin (PCM) Isıl Özellikleri (Alassaad ve Ark., 2025)

Faz Değiştiren Materyal (PCM)	Isıl İletkenlik (Sıvı→Katı) λ (W/m°C)	Gizli Isı Kapasitesi (L) (kJ/kg)	Özgül Isı (Sıvı→Katı) c_p (J/kg°C)	Erime Sıcaklığı (°C)
Kalsiyum klorür heksahidrat (CaCl ₂ •6H ₂ O)	0,53/1,09	187	1530/1710	29,9
InfiniteRPCM	0,54/1,09	200	3140	18–21–23–25–29
BioPCM27	1,50/1,80	225	2000	21–23–25–27–29
Infinite R TM	0,54/1,09	200	3140	19–30
Parafin	0,2	180	2230	20
Tuz hidratı (CaCl ₂ •6H ₂ O)	0,54/1,08	122,3/116,9	2310/1340	26
RT27 (Organik)	0,2	180	1800/2400	26
RT42 (Organik)	0,21	220	3200	42
Setan	0,2	231	2800/3200	18
Heptadekan	0,2	200	2800/3200	22
Oktadekan	0,2	241	2800/3200	28
Tuz hidratı	0,476/0,514	281	1442/1520	35
Infinite RPCM25C	0,815	200	3140	25
Infinite RPCM18C				18
n-oktadekan ve n-heptadekan	0,213	187,6	1662	23
Belirtilmemiş	0,25/0,5	216	1785	18–26
Organik (RT 28)	0,2	250	-	28
Organik (RT 18)		260		18
PCM-25	0,54/1,059	200	1540	25
PCM-29				29
Parafin mumu (RT35 HC)	0,2	240	2000	35
Parafin mumu (RT44 HC)		250	2000	44
Rubitherm® RT25HC	0,2	230	2000	25

2.1. Erime Sıcaklığı

PCM’nin erime sıcaklığı, beton bir yapı içinde ısı kontrol için hedef sıcaklık aralığıyla uyumlu olması gerektiğinden, etkili sıcaklık düzenlemesi için önemlidir. PCM’nin ısıyı soğurduğu veya saldığı faz değişim süreci, optimum performansı sağlamak ve en yüksek enerji tasarrufuna ulaşmak için günlük veya mevsimsel sıcaklık dalgalanma aralığında gerçekleşmelidir. Wang ve Ark. (2018), PCM’lerin eklenmesi, PCM18P ile yaklaşık 4 °C ve PCM25P ile 5 °C’lik hidrasyon sırasında önemli sıcaklık azalmalarına neden olduğunu

bildirmişlerdir. Daha yüksek erime sıcaklığına (25 °C) sahip PCM, kontrol ile karşılaştırıldığında tepe sıcaklığını yaklaşık 60 dakika geciktirirken, PCM18P karışımı 35 dakikalık bir gecikme göstermiştir. Ayrıca, sıcak yaz koşullarında Şanghay'daki bir binada bir simülasyon çalışması yapmışlardır. Farklı erime noktalarına (31 °C, 35 °C, 42 °C, 47 °C, 50 °C ve 55 °C) sahip PCM'lerin ısı akışını azaltmada farklı etkililiklere sahip olduğu belirlenmiştir. 42 °C RT42 erime sıcaklığına sahip PCM en iyi performansı göstermiştir ve en eksiksiz erime-katılma döngüsünü belirlenmiştir. Ofis saatleri sırasında diğer çok erken eriyen veya tamamen katılaşmayan PCM'lere kıyasla %28,3 oranında en yüksek ısı kazanımı azaltma oranı gerçekleşmiştir.

Optimum enerji tasarrufları genellikle tipik iç mekan konfor sıcaklıklarına karşılık gelen 24 °C ile 26 °C arasındaki PCM erime sıcaklıklarıyla belirlenmiştir. Her erime noktası, belirli referansları tanımlayan semboller ve renklerle ayrı bir deneysel veya simülasyon tabanlı çalışmayı temsil etmektedir. Bu eğilim, pasif enerji tasarruflarını en üst düzeye çıkarmak için PCM ısı özelliklerinin ortam ısı yükleriyle eşleştirilmesinin önemini vurgular.

Terhan ve Ilgar (2023), PCM'leri dış duvarlara yerleştirmenin etkisini değerlendirmek için enerji simülasyon yazılımı kullanarak İstanbul'da bulunan bir konut binası modeli konusunda bir çalışma yapmışlardır. Analizde, çeşitli erime sıcaklıkları dikkate alınmış ve binanın yıl boyunca ısıtma ve soğutma enerjisi talepleri değerlendirilmiştir. 21 °C ile 23 °C arasındaki erime sıcaklıklarına sahip PCM'lerin en yüksek enerji tasarrufu sağlandığı, %21,32 ısıtma ve %24,45 soğutma enerjisi tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir.

Zhou ve Ark. (2024), kuru iklim koşullarında *Trombe duvar*ların ısı performansı üzerinde PCM erime noktalarının etkilerini araştırmışlardır. Simülasyonlar, yazın, 38 °C erime noktasına sahip bir PCM tabakası kullanılması maksimum tepe yükünü %48,9 oranında ve sıcaklık dalgalanmasını %76 oranında ve soğutma yükünü %14,4 oranında azaltmıştır. Maksimum iç mekan sıcaklıkları için 4,5 saat ve minimum iç mekan sıcaklıkları için 6,1 saat süre gecikmeleri belirlenmiştir. Kışın, 30 °C erime noktasına sahip bir PCM ısı yükü %38,2 oranında ve dalgalanmaları %28,5 oranında azaltmıştır.

Sonuçlar, uygun bir erime noktasına sahip bir PCM seçmenin ısı düzenlemeyi optimize etmek için çok önemli olduğunu, çünkü tepe sıcaklıklarını etkili bir şekilde azalttığını ve ısı salınımını geciktirdiğini, daha kararlı ısı koşullar sağladığını ve ısı genleşmeyle ilişkili riskleri en aza indirdiğini göstermektedir.

2.2. Faz Değiştiren Materyallerin Isıl Özellikleri

PCM'ler, binaların ısı performansını artırma potansiyelleri nedeniyle son yıllarda önemli ilgi görmüştür. Bina uygulamalarında etkinliklerini etkileyen PCM'lerin başlıca özellikleri; ısı iletkenlik, gizli ısı ve özgül ısı değerleridir. Bu özelliklerin her biri, bir PCM'nin ısıyı ne kadar iyi soğurabileceğini, depolayabileceğini ve serbest bırakabileceğini belirlemede önemli bir rol oynar. Bu özellikler bir binanın enerji verimliliğini ve ısı konforunu doğrudan etkiler. Isı iletkenlik, ısı transfer hızını etkiler; PCM'lerin düşük ısı iletkenliği, ısıyı yavaş bir şekilde soğurmalarına ve serbest bırakmalarına olanak tanır. Bu özellik, zaman içinde daha kararlı bir sıcaklığın korunmasına yardımcı olur ve enerji tüketimin azaltarak ısı konforu iyileştirir. Faz değişimi sırasında soğurulan veya serbest bırakılan enerji olan gizli ısı, ısı enerjisi depolaması için çok önemlidir. Sıcak dönemlerde ısıyı depolayarak ve soğuk

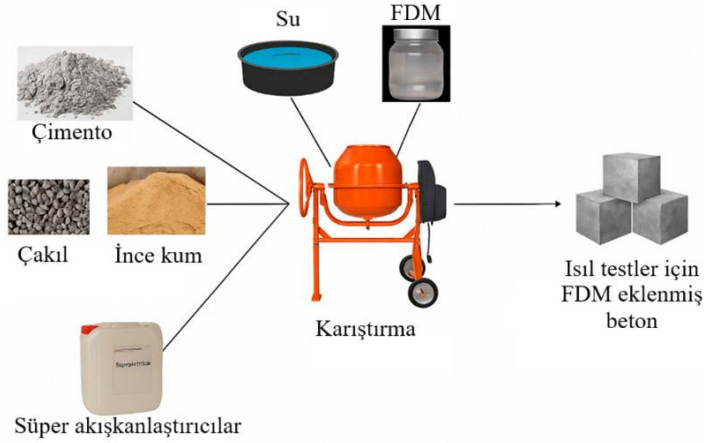
dönemlerde serbest bırakarak iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını azaltır. Özgül ısı (c_p), bir PCM'nin duyulur ısı olarak ne kadar ısı depolayabileceğini etkiler ve faz geçişlerinden önce ve sonra binanın ısıl kütesine katkıda bulunur. Bu özellikler, PCM'lerin iç mekan sıcaklıklarını dengelemesine, ısı akışını azaltmasına ve yapı malzemelerine entegre edildiğinde genel enerji verimliliğini iyileştirmesine olanak tanır.

Li ve Ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, alçı, kil tuğla ve çimentodan yapılmış bir duvar yapısında PCM'ler test edilmiştir. Isıl iletkenlik, özgül ısı ve gizli ısı gibi termofiziksel özellikler değerlendirilmiştir. 177 kJ/kg gizli ısıya, 7085 J/kg·K özgül ısıya ve 0,148 W/m·K ısıl iletkenliğe sahip PCM olarak kullanılan Enerciel 22'nin ısı transferini %15,6–47,6 oranında azalttığı belirlenmiştir. Buna karşılık, 190 kJ/kg, 3020 J/kg·K ve 1 W/m·K değerlerine sahip $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ısı transferini sadece %2–7,8 oranında azaltmıştır. Bu durum, PCM'lerde daha düşük ısıl iletkenlik ve daha yüksek özgül ısı değerlerinin ısı transferi azalmasını artırdığını gösterir.

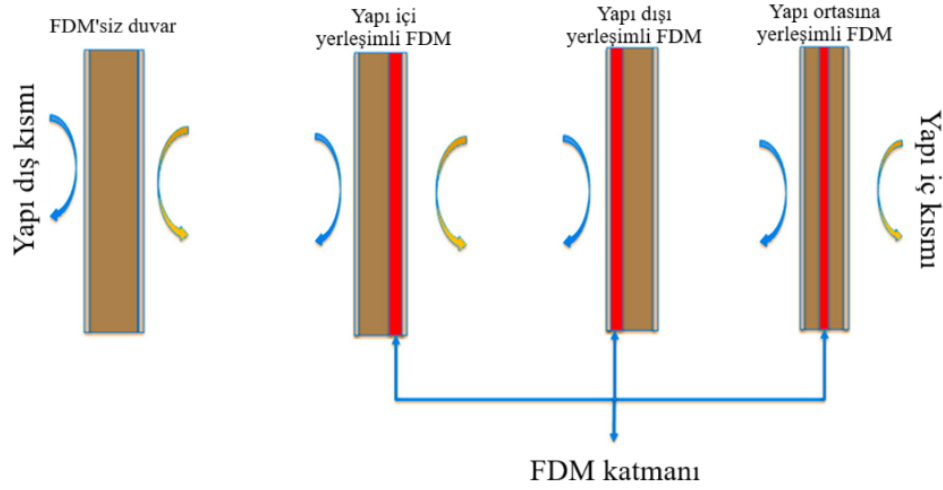
Zhang ve Ark. (2021), PCM ısıl iletkenliğinin ve gizli ısının etkisini araştırmışlardır. PCM'lerin ısıl iletkenliğinin ısıl düzenlemedeki etkinliklerini belirlemede kritik olduğunu belirlemişlerdir. Daha yüksek ısıl iletkenlik, PCM'nin faz değişimi sürecinde ısıyı daha verimli bir şekilde soğurmasını ve salmasını sağlar. Çalışmada, 100 ile 200 kJ/kg arasında gizli ısıya sahip PCM'ler incelenmiştir. Isıl iletkenliğin bu aralıkta gizli ısıya göre performans üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Geliştirilmiş bir ısıl iletkenlik, ısının PCM'den hızla aktarılabilmesini sağlayarak sıcaklık değişimlerine daha hızlı tepkiler verilmesini ve daha verimli bir ısı enerjisi depolama sistemiyle sonuçlanmasını sağlamıştır. Bu durum, enerji tasarruflarını optimize etmek ve bina uygulamalarında konforu korumak için daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip PCM'leri seçmenin önemini vurgulamaktadır.

3. BİNALARDA FAZ DEĞİŞTİREN MATERYAL UYGULAMALARI

PCM'ler, Görsel 1'de gösterildiği gibi, beton matrisine gömülebilir veya Görsel 2'de gösterildiği gibi ayrı bir katman olarak uygulanabilir. Görsel 2'deki yapılandırmalar, PCM kullanılmayan referans duvarı ve duvar kesitine göre iç, dış ve orta konumlara yerleştirilmiş PCM kullanılan duvarları göstermektedir. Diyagram, PCM yerleşiminin pasif bina sistemlerinde dış ortamdan iç ortama ısı akışı nasıl etkilediğini göstermektedir. Bu tür PCM uygulamaları ile ısı depolama kapasitesi artırılabilir ve ısıyı soğurarak ve serbest bırakarak iç mekan sıcaklıklarının düzenlenmesine yardımcı olunur. Bu entegrasyon enerji verimliliğini artırır, ısıtma ve soğutma sistemlerine olan bağımlılığı azaltır ve daha kararlı ve konforlu iç ortam oluşmasına katkı sağlar.

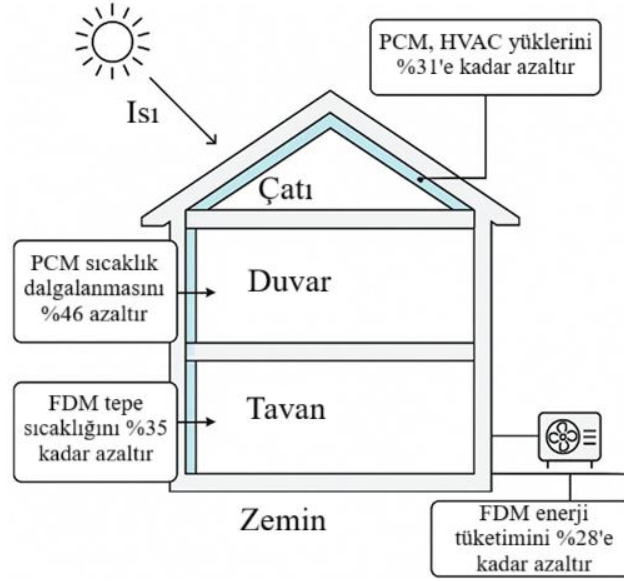


Görsel 1. Faz Değiştiren Materyalin (PCM) Betona Gömülmesi Sürecini Gösteren Şema (Alassaad ve Ark., 2025)



Görsel 2. Duvar İçinde Faz Değiştiren Materyal (PCM) Katmanının Farklı Olası Konumlarını Gösteren Bir Duvar Kesitinin Şematik Gösterimi (Alassaad ve Ark., 2025)

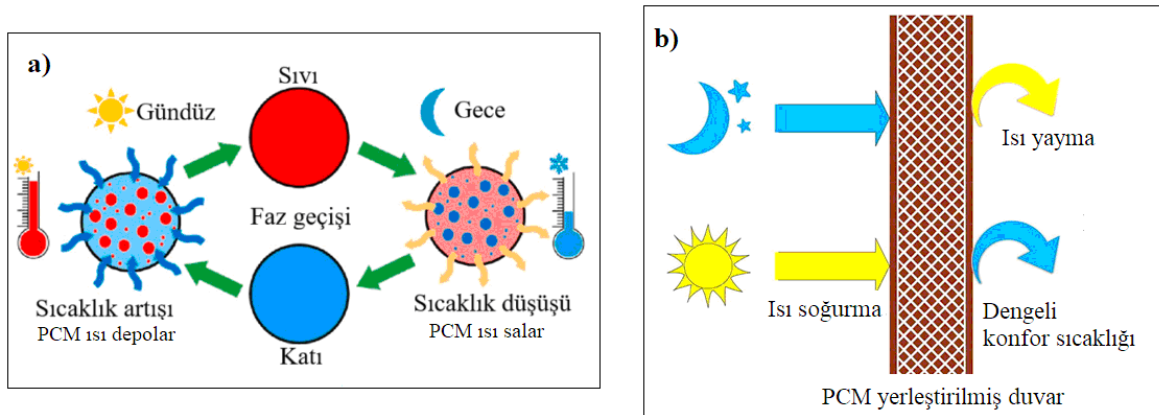
PCM'nin farklı bina bileşenlerine entegrasyonu ile ilgili olarak, PCM'ler duvar, çatı, zemin ve tavan sistemlerine başlıca iki şekilde entegre edilebilir. Bu tasarımlar belirgin katmanlı bir uygulama veya gömülü sistemler olarak Görsel 3'de gösterilmiştir. Katmanlı uygulamalarda, PCM panelleri duvar yapısının içine yerleştirilir, genellikle yalıtım malzemeleri arasına sıkıştırılır veya duvar panellerinin yüzeyine uygulanır, bu da kurulum ve yeniden donatma kolaylığı sağlar. Son araştırmalar ayrıca çok katlı binalarda PCM'leri yerleştirmek için yenilikçi boşluklar olarak katlar arası boşluk oluşturucuların kullanımını da araştırmıştır.



Görsel 3. Faz Değiştiren Materyalleri (PCM) İçeren Bir Bina Kabuğunun Kavramsal Çizimi (Alsaad ve Ark., 2025)

PCM'ler, ısıyı pasif olarak soğurmak ve serbest bırakmak, iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını, tepe sıcaklıklarını ve genel ısıtma ve soğutma enerji talebini azaltmak için duvarlara, tavanlara ve çatılara gömülür. Görsel 3'de verilen şema, PCM'lerin bina uygulamalarında termal konfor artırma ve enerji tüketimini azaltma potansiyelini göstermektedir.

Bu yaklaşım (Görsel 4a), gündüz boyunca aşırı ısıyı soğurarak ve daha soğuk dönemlerde serbest bırakarak iç mekan sıcaklıklarını düzenlemeye esnek ve etkilidir. PCM yerleştirilmiş duvar malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar, iç mekan sıcaklıklarını sabitleyerek ve ısıtma ve soğutma yüklerini azaltarak ısı düzenlemeyi ve enerji verimliliğini artırma potansiyellerini vurgulamaktadır. Dardouri ve Ark. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, PCM'leri binaların çatısına ve duvarlarına yerleştirmenin enerji tasarrufu etkilerini değerlendirmiştir. PCM'leri çatıya yerleştirildiğinde, ısıtma ve soğutmada %31,42 oranına kadar azalma ile önemli düzeyde enerji tasarrufu sağlamıştır. PCM'ler duvarlara yerleştirildiğinde (Görsel 4b), ısıtma ve soğutma için enerji tasarrufu %9 oranına kadar yükselmiştir.

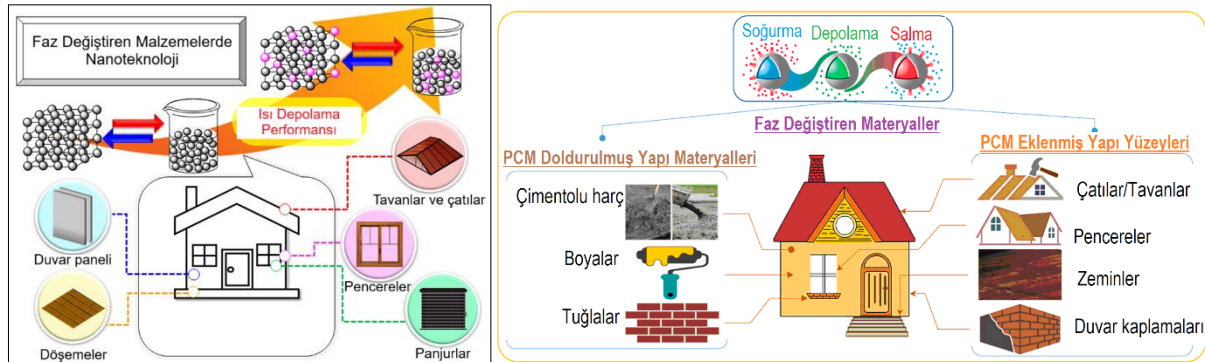


Görsel 4. a) PCM Tarafından Isı Soğurulması Ve Serbest Bırakılması, b) Duvara Yerleştirilmiş PCM'nin Çalışma İlkesi

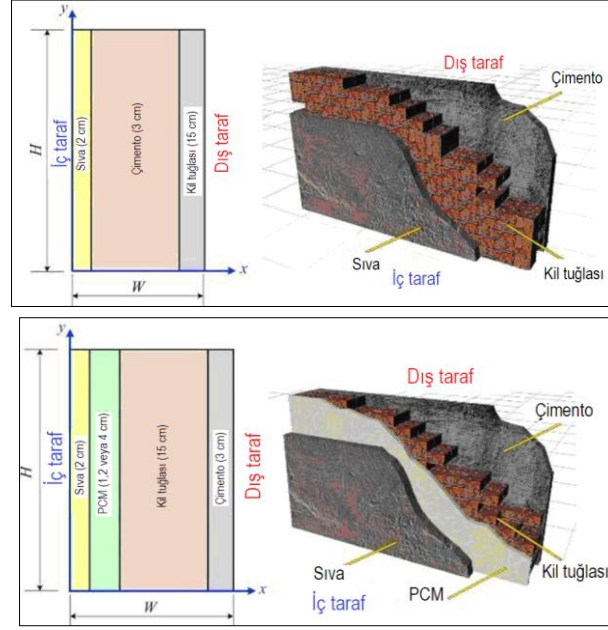
3.1. Faz Değiştiren Materyalin Bina Duvarına Yerleştirilmesi

Önceki araştırmalar, Görsel 5’de gösterildiği gibi, bina kabuğu içindeki PCM konumunun bina kabuğunun ısı performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Nizovtsev ve Sterlyagov (2024), bir duvardaki PCM katman konumunun etkisini incelemişlerdir. PCM katmanı için en uygun yerin, ısı akışı dalgalanmalarını 13 kat azalttığı ve ısı transferini 6,2 saat geciktirdiği duvarın merkezi bölgesi olduğunu ve en iyi ısı performansı sağladığını belirlemişlerdir. PCM’yi iç yüzeye yerleştirmek daha az etkilidir. Daha yüksek ısı akışı dalgalanmaları ve daha kısa bir gecikmeyle, ancak yine de ısı akışı yoğunluğunun 35–40 W/m² değerine ulaşmasıyla termal ataleti önemli ölçüde iyileştirmiştir. PCM’yi dış yüzeye yakın yerleştirmek, ısı akışında minimum bir azalma ile en az faydayı sağlamıştır.

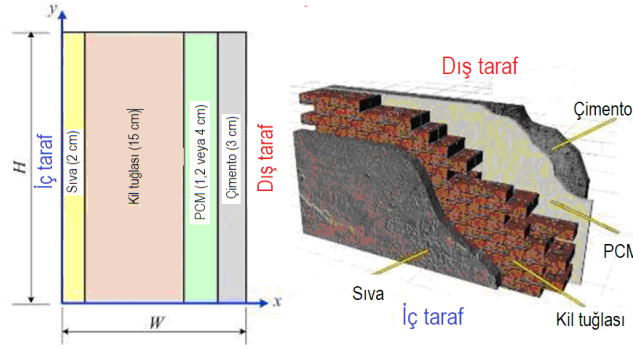
Li ve Ark. (2021), duvarlardaki PCM katman yerleşiminin bina ısı performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. PCM’i iç yüzeye daha yakın yerleştirmenin ısı düzenlemeyi iyileştirdiği ve iç ortam sıcaklığını daha uzun süre konfor bölgesinde tuttuğu belirlenmiştir. Bunun aksine, dış ortama yakın yerleştirmek, dış ortam koşullarına daha fazla maruz kalma nedeniyle iç ortam yerleşimine kıyasla %84 oranında verim azalmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, PCM’i iç ortama yakın yerleştirmek ısı performansı ve enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkarmıştır. Bunun başlıca nedeni, iç yerleşimin yalıtımın dış ısıya karşı bir bariyer görevi görmesini sağlayarak, PCM’in doğrudan dış koşullara maruz kalmasını engellemesi ve bunun da ısı depolama kapasitesinin erken erimesine ve doygunluğuna neden olabilmesidir.



Görsel 5. Binanın Farklı Bileşenlerinde Faz Değiştiren Materyal (PCM) Kullanımı



a) PCM Kullanılmayan Duvar Kesiti b) PCM İç Tarafa Yakın Yerleştirilmiş Duvar Kesiti



c) PCM Dış Tarafa Yakın Yerleştirilmiş Duvar Kesiti

Görsel 6. Bina Duvarına PCM Yerleştirilmesi (Sun ve Ark., 2014)

İç, dış ve orta olmak üzere üç farklı duvar konumuna yerleştirilen PCM'ler kullanılarak binaların ısı performansını incelenmiştir. PCM'leri duvarın iç kenarına yerleştirmenin, konfor bölgesindeki iç sıcaklığının yaklaşık %99'u için üstün ısı performans sağlamıştır. Bu durum yazın %20 ve %53, kışın ise orta ve dış yerleşimlere kıyasla sırasıyla, %23 ve %43 oranında arttırmıştır (Lagou ve Ark., 2019). Bu yapılandırma, iç ortam sıcaklık dalgalanmalarıyla daha iyi uyum sağlayarak enerji depolama ve salımını optimize etmiştir. Li ve Ark. (2019), PCM'in duvarlara yerleştirilmesinin ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. PCM dış yüzeye daha yakın konumlandırıldığında, ısı transferini daha etkili bir şekilde azaltmış ve yaklaşık %47,6 oranında azalma belirlenmiştir. PCM'in iç ortama daha yakın yerleştirilmesi yaklaşık %46,8 oranında biraz daha düşük bir azalma sağlamıştır. Bu bulgular, PCM konumlandırmasının ve malzeme seçiminin enerji verimliliğini artırmadaki önemini vurgulamaktadır.

3. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bina yapılarına PCM'lerin entegrasyonunun ısı performansını önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte PCM'lerin etkinlikleri çeşitli kritik faktörlerden etkilenir. PCM'lerin erime sıcaklığı, optimum ısı performans için çok önemlidir. Erime sıcaklığı, günlük ve mevsimsel sıcaklık dalgalanmaları sırasında etkili ısı soğutulması ve salımını sağlamak için iç ortam sıcaklık aralığıyla uyumlu olmalıdır. Çalışmalar, yerel iklim koşullarına uygun erime sıcaklıklarına sahip PCM'lerin seçilmesinin, en yoğun ısıtma veya soğutma dönemlerinde iç ortam sıcaklıklarını sabitleyerek enerji tasarrufunu %50 oranına kadar önemli ölçüde artırabileceğini bildirmektedir. Ayrıca, erime sıcaklığı sadece bir yük/sezon (ısıtma veya soğutma) için tasarlanmışsa, PCM'ler tüm yıl boyunca yeterli faydaya sahip olmayabilir veya daha da kötüsü, istenmeyen ısı etkileri üretebilir.

PCM'lerin ısı iletkenlik, gizli ısı ve özgül ısı gibi ısı özellikleri, performansları için önemlidir. Yüksek gizli ısı, daha fazla enerji depolama kapasitesine olanak sağlarken, yeterli ısı iletimi, faz geçişleri sırasında etkin ısı transferi sağlar. Özgül ısı, bir malzemenin duyulur ısıyı depolama yeteneğini etkiler. Bu durum binalarda etkili ısı yönetim için optimize edilmiş ısı özelliklere sahip PCM'lerin seçimini önemli hale getirir.

PCM katmanlarının kalınlığı, ısıyı depolama ve serbest bırakma etkinliklerini doğrudan etkiler. Daha kalın PCM katmanları daha fazla ısı kütle sağladığından, etkin enerji depolama ve uzun süreli ısı düzenlemeye olanak sağlar. Ancak, belirli bir kalınlığın ötesinde kazanımlar azalır. Bu durum ısı performans ile maliyet ve kurulum gibi pratik konular arasında optimum bir dengeye ihtiyaç olduğunu gösterir.

PCM'lerin etkinliği farklı iklim bölgelerinde değişir. Daha sıcak iklimlerde, PCM'ler gündüz aşırı ısıyı soğurarak ve geceleri serbest bırakarak soğutma yüklerini azaltabilir. Daha soğuk iklimlerde, gündüz ısıyı depolayarak ve geceleri ısı kaybını en aza indirerek sıcaklığın korunmasına yardımcı olurlar. Bu nedenle, enerji tasarrufunu ve ısı konforu en üst düzeye çıkarmak için PCM özelliklerinin iklime özgü özelleştirilmesi gereklidir.

PCM'lerin duvarlar, çatılar ve zeminler gibi yapı bileşenlerine yerleştirilmesi, performanslarında önemli bir rol oynar. Örneğin, ılıman iklimlerde, PCM'lerin duvarlara ve çatılara yerleştirilmesi %31 oranına kadar enerji tasarrufu sağlarken, sıcak iklimlerde, en yüksek iç ortam sıcaklıkları 5 °C'ye kadar azaltılarak ısı konforu artırılmıştır. Binaların çatıları genellikle en yüksek düzeyde güneş ışınımına maruz kalır. Bu durum soğutma taleplerini azaltmak amacıyla PCM kullanımını ideal hale getirirken, duvarlar ısı yalıtımını artırmak ve sabit iç ortam sıcaklıklarını korumak için optimize edilebilir.

PCM katmanının bir duvar tertibatı içindeki konumu, ısı transferi ile nasıl etkileşime girdiğini etkiler. PCM'lerin iç tarafa daha yakın olarak yerleştirilmesi, zaman gecikmelerini uzatarak ve ısı akışını %46'dan fazla azaltarak iç ortam konforunu korumak için daha etkilidir. Çünkü bu uygulama daha iyi ısı soğutulması ve gecikmeli ısı salımı sağlar. Tersine, dış yerleşimler PCM'leri dış ortam sıcaklık dalgalanmalarına maruz bırakabilir. Bu durum PCM'lerin verimliliklerini azaltabilir.

Binaların yönü, PCM'lerin güneş ışınımı ve ortam sıcaklıklarıyla nasıl etkileşime girdiğini etkiler. Örneğin, uzun süre güneşe bakan duvarlar ve çatılar, güneş ısını soğurmak ve depolamak için PCM entegrasyonundan faydalanabilir. Böylece iç ortam soğutma

gereksinimlerini azaltabilir. Bina yöneliminin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi, PCM sistemlerinin genel performansını artırabilir ve daha tutarlı enerji tasarrufları sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Alassaad, K.; Minto, J.; de Wilde, P. Enhancing Building Thermal Performance: A Review of Phase Change Material Integration. *Energies* 2025, 18, 3200. <https://doi.org/10.3390/en18123200>.
- [2] Dardouri, S.; Tuncbilek, E.; Khaldi, O.; Arıcı, M.; Sghaier, J. Optimizing PCM Integrated Wall and Roof for Energy Saving in Building under Various Climatic Conditions of Mediterranean Region. *Buildings* 2023, 13, 806.
- [3] Lagou, A.; Kylili, A.; Šadauskiene, J.; Fokaides, P.A. Numerical investigation of phase change materials (PCM) optimal melting properties and position in building elements under diverse conditions. *Constr. Build. Mater.* 2019, 225, 452–464.
- [4] Li, Z.X.; Al-Rashed, A.A.A.A.; Rostamzadeh, M.; Kalbasi, R.; Shahsavar, A.; Afrand, M. Heat transfer reduction in buildings by embedding phase change material in multi-layer walls: Effects of repositioning, thermophysical properties and thickness of PCM. *Energy Convers. Manag.* 2019, 195, 43–56.
- [5] Li, M.; Cao, Q.; Pan, H.; Wang, X.; Lin, Z. Effect of melting point on thermodynamics of thin PCM reinforced residential frame walls in different climate zones. *Appl. Therm. Eng.* 2021, 188, 116615.
- [6] Nizovtsev, M.I.; Sterlyagov, A.N. Effect of phase change material (PCM) on thermal inertia of walls in lightweight buildings. *J. Build. Eng.* 2024, 82, 107912.
- [7] Terhan, M.; Ilgar, G. Investigation of used PCM-integrated into building exterior walls for energy savings and optimization of PCMmelting temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2023, 369, 130601.
- [8] Wang, Q.; Wu, R.; Wu, Y.; Zhao, C.Y. Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction. *Energy Build.* 2018, 172, 328–336.
- [9] Zhang, Q.; Yang, Z.; Wang, G. Numerical and experimental investigation on dynamic thermal performance of floor heating system with phase change material for thermal storage. *Indoor Built Environ.* 2021, 30, 621–634.
- [10] Zhou, S.; Song, M.; Shan, K.; Razaqpur, A.G.; Huang, J.J. Effects of the position and melting point of the PCM layer on the comprehensive thermal performance of a Trombe wall under mixed dry climate. *Energy Build.* 2024, 307, 113932.

TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE ISI POMPASI KULLANIMI

Prof.Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

Çukurova Üniversitesi, hhozturk@cu.edu.tr- ORCID ID: 0000-0001-6904-5539

Arş. Gör. Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM

Iğdır Üniversitesi, kaan.kucukerdem@igdir.edu.tr- ORCID ID: 0000-0002-1593-4725

Dr. Öğr. Üyesi Ümran ATAY

Mardin Artuklu Üniversitesi, umranatay@artuklu.edu.tr - ORCID ID: 0000-0002-2248-4582

ÖZET

Düşük karbonlu iklimlendirme sistemlerine geçiş, özellikle küresel sera gazı (GHG) emisyonlarının önemli bir oranını oluşturan inşaat sektöründe iklim nötrlüğüne ulaşmak için temel öneme sahiptir. Çeşitli iklimlendirme teknolojiler arasında ısı pompaları (HP), yüksek enerji verimlilikleri ve özellikle yenilenebilir elektrikle çalıştırıldıklarında karbondioksit (CO₂) emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyelleri nedeniyle önemli bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, hava kaynaklı (ASHP), toprak kaynaklı (GSHP) ve su kaynaklı (WSHP) ısı pompalarının teknik performans ve çevresel etkilerini değerlendirmek için güncel literatürden elde edilen bulgular incelenmektedir. Ayrıca yaşam döngüsü GHG emisyonları, coğrafi enerji karışımı çeşitliliğinin etkisi ve ısı pompalarının hibrit ve bölgesel ısıtma sistemlerine entegrasyonu da tartışılmaktadır. Hibrit HP sistemlerinde en düşük özgül GHG salımı gerçekleşir. Bu değer, verilen ısı enerjisinin kWh'ı başına ortalama olarak 0,108 kgCO₂-eq düzeyindedir. HP sistemleri, teknoloji türüne ve enerji karışımına bağlı olarak %90 oranına ulaşan potansiyel GHG salımı azaltma potansiyeline sahiptir. Yüksek yatırım maliyetlerine rağmen, GSHP ve WSHP'lerin daha düşük çevresel ayak izi (FP), daha kararlı ısı girdi ve daha yüksek sezonluk performans katsayısından (SCOP) kaynaklanan daha iyi performansları nedeniyle bina sektörünün karbonsuzlaştırılması için bu teknolojileri cazip seçenekler haline getirmektedir. Isı pompalarının ısı depolama, yenilenebilir enerji ve akıllı kontrol teknolojileriyle entegrasyonu, pazar potansiyellerinin karşı karşıya olduğu zorluklara rağmen verimliliklerini ve iklimsel faydalarını daha da artırmaktadır. Özellikle hibrit tasarımlardaki ısı pompaları, sürdürülebilir bina ısı temini ve enerji dönüşümü için temel bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Faydalarına rağmen, ısı pompalarının yaygın olarak benimsenmesi, yüksek ilk yatırım maliyetleri, eski binalarda iyileştirme zorlukları ve şebeke kapasitesi sınırlamaları gibi teknik ve ekonomik engellerle karşı karşıyadır. HP teknolojisinin yaygın olarak kullanılmasını hızlandırmak için sübvansiyonlar, performans standartları ve altyapı yatırımları yoluyla politika desteği gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: : Tarımsal yapılar, İklimlendirme, Isı pompası

1. GİRİŞ

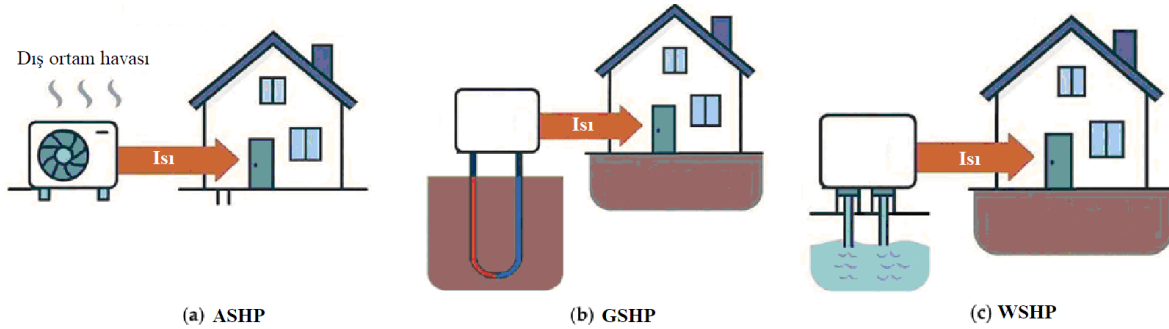
Sürdürülebilir ısıtma çözümlerine geçiş, özellikle ısıtmanın enerji tüketimi ve sera gazı (GHG) emisyonlarının önemli bir payını oluşturduğu inşaat sektöründe, küresel

karbonsuzlaştırma çabalarının önemli bir parçasıdır. Isı pompaları, enerji verimliliğini korurken karbon emisyonlarını azaltmak için birincil bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Isı pompaları, havadan, topraktan veya su kaynaklarından ısı enerjisini aktararak, fosil yakıtlara dayalı geleneksel ısıtma yöntemlerine oldukça verimli bir alternatif sunar.

Isı pompalarının çalışma ilkesi, serbest veya atık enerjinin kapalı devre bir işlemle daha yüksek sıcaklıktaki ısıya dönüştürülmesi sürecine dayanır. Ters *Carnot* çevriminde çalışan bu pompalar, düşük sıcaklıktaki ısıyı kullanır, daha yüksek bir sıcaklığa yükseltir ve binanın her yerine dağıtır. Piyasada, çalışma ilkeleri, ısı kaynakları, uygulamaları veya ölçekleri bakımından farklılık gösteren çeşitli ısı pompası türleri mevcuttur.

Isı pompaları genellikle ısı kaynaklarına göre sınıflandırılır (Görsel 1):

- *Hava kaynaklı ısı pompaları* (ASHP): Isıyı ısı kaynağı olarak ortam havasından alır ve ısıyı doğrudan havadan (havadan→havaya) veya hidrolik sistemler (havadan→suya) aracılığıyla iletir.
- *Toprak kaynaklı ısı pompaları* (GSHP): Isıyı topraktan çeker; enerji toprak ısı değiştiricileri veya sondajlı ısı değiştiricileri aracılığıyla kullanır.
- *Su kaynaklı ısı pompaları* (WSHP): Isıyı sudan çeker. Açık veya kapalı devre sistemler aracılığıyla kuyular, akarsular, göller ve göletler gibi yerel su kaynaklarını kullanır.



Görsel 1. Isı Kaynağına Bağlı Olarak Isı Pompası Türleri

Isı pompalarının kullanımıyla ilgili en önemli teknik faktörler Çizelge 1’de verilmektedir. Çizelge 1’deki teknik değişkenlerin nicel karşılaştırması, ısı pompası tipleri arasında farklı çalışma özelliklerini ortaya koymaktadır. Toprak kaynaklı (GSHP) ve su kaynaklı (WSHP) ısı pompaları genellikle daha yüksek besleme sıcaklığı sınırları (70 °C’ye kadar) sunarak geleneksel radyatör sistemleriyle uyumluluk sağlarken, hava kaynaklı üniteler (ASHP) genellikle 65 °C’ye kadar ulaşır. Isı pompalarının performansını etkileyen teknik konular, ısı kaynağı tipine bağlı sıcaklık kararlılığı temelinde değerlendirilebilir. Bu bağlamda, ASHP çok çeşitli dış hava koşullarında (-20 ile +35 °C) çalışır. Bu durum mevsimsel performansı önemli ölçüde etkileyebilir. Buna karşılık, GSHP ve WSHP sırasıyla, -10 ile +25 °C ve +5 ile +25 °C arasında değişen daha kararlı yeraltı veya su kaynağı sıcaklıklarından faydalanır.

Bu ısıl üstünlükler, mevsimsel performansın iyileştirilmesine katkıda bulunur. Mevsimlik performans katsayısı (SCOP) değerlerinde görüldüğü gibi, GSHP en yüksek mevsimsel verimliliğe (5,0’a kadar) ulaşırken, bunu WSHP (4,5’e kadar) ve ASHP (genellikle 2,8 ile 3,5 arasında) izlemektedir. Bu farklılıklar, daha kararlı ve ılımlı kaynak sıcaklıklarına sahip sistemlerin (GSHP ve WSHP) yıl boyunca daha iyi enerji verimliliği sağlama eğiliminde

olduğunu ve daha soğuk iklimler veya yüksek sıcaklıklı ısıtma talepleri için daha uygun olduğunu doğrulamaktadır.

Çizelge 1. Isı Pompası Performansının Teknik Yönleri (Zelazna ve Pawłowski, 2025)

Ölçütler	Hava Kaynaklı Isı Pompası (ASHP)	Toprak Kaynaklı Isı Pompası (GSHP)	Su Kaynaklı Isı Pompası (WSHP)
Sıcaklık kararlılığı	Değişken - hava koşullarından büyük ölçüde etkilenir	Son derece kararlı - yer altı sıcaklıkları sabit kalır	Yüksek kararlılık - yeraltı suyu
Isıtma durumunda COP aralığı	~2,0–4,5	~3,5–6,5	Orta kararlılık - yüzey suyu
Ortam koşullarına duyarlılık	Yüksek	Düşük	~3–6
Kurulum maliyeti	Genellikle daha düşük; ılıman iklimlerde tercih edilir	Kirli zemin sisteminin kurulumu (delme/kazı) nedeniyle daha yüksek	Kullanılan su türüne bağlı olarak düşük ile orta
Besleme sıcaklığı [°C]	65'e kadar	70'e kadar	Genellikle GSHP'lere benzer veya daha yüksek, maliyeti etkileyen belirli saha koşulları
Çalışma sıcaklığı [°C]	-20 ile +35	-10 ile +25	70'e kadar
Ses seviyesi [dB(A)]	<68	<55	+5 ile +25
Yatırım maliyeti [€/kW]	>700	>1100	<552

Yeraltı (veya yeraltı suyu) sıcaklıkları kısmen sabit ve kış havasından daha sıcak kaldığından, GSHP mevsim boyunca neredeyse sabit COP değerlerinde çalışabilir. Bu nedenle ortam koşullarına duyarlılıkları düşük kalır. Bu durum, Avustralya, Perth'te aynı evlerde açık devre GSHP ile ASHP'ini karşılaştıran durum çalışmasının sonuçlarında belirtilmektedir. Sonuçlar, GSHP'nin ısıtma durumunda COP değerinin ortalama ~3,9 olduğunu ve dış ortam sıcaklığından esasen etkilenmediğini, ASHP'nin ısıtma COP değerinin ise ortam koşullarına bağlı olarak 1,9 ile 2,9 arasında değiştiğini göstermiştir (Aprianti ve Ark., 201). Hava kaynaklı ısı pompaları, dış hava sıcaklıkları büyük ölçüde dalgalandığı ve kışın azaldığı için daha düşük ve daha değişken mevsimsel ısıtma verimliliğine sahiptir. Ilıman iklimlerde, modern ASHP'ler iyi tasarlanmışlarsa yeterli SCOP ile performans gösterebilirler. Rossi di Schio ve Ark. (2021) tarafından İtalya'da yapılan bir çalışmada, ılıman bir kıyı şehrindeki (S. Benedetto) bir ASHP'nin yaklaşık 2,86–2,99 aralığında bir etkin SCOP değerine sahip olduğunu, soğuk bir dağ ikliminde (Livigno) ise aynı ASHP'nin SCOP değerinin yaklaşık 2,72–2,83 aralığına azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, buzu temizlemek için gereken defrost döngüleri, ASHP'nin mevsimsel COP değerini önemli ölçüde azaltmıştır. SCOP, belirtilen ilk konumda yaklaşık 2,93 iken, defrostlar ihmal edildiğinde 3,09'a yükselmiştir. Bu durum defrost enerjisi ihtiyaçları nedeniyle yaklaşık %5 oranında bir azalmaya neden olmuştur.

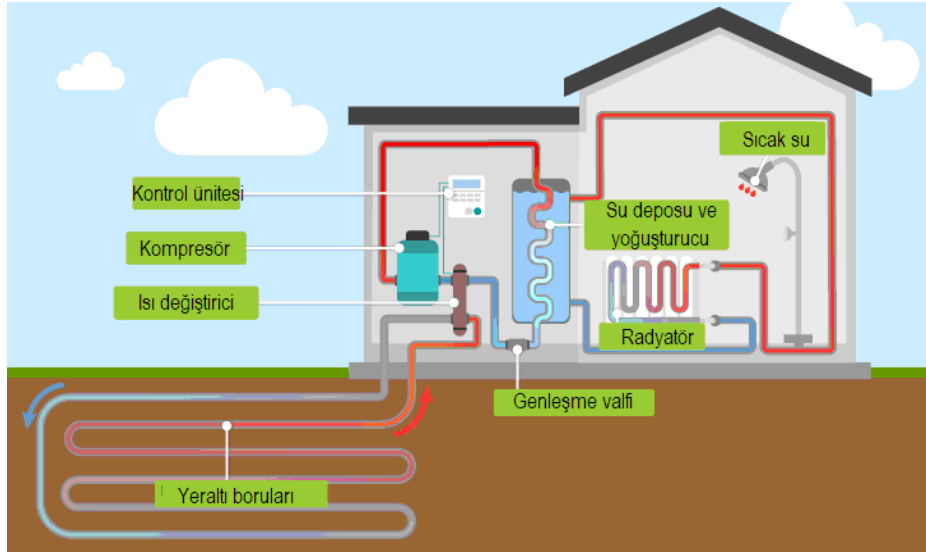
2. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI

2.1. Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Faydaları

Toprak kaynaklı bir ısı pompası (GSHP) (Görsel 2) kullanmanın başlıca faydalarından bazıları şunlardır:

- ✓ Düşük karbon emisyonu, karbon ayak izinizi azaltmaya yardımcı olur.

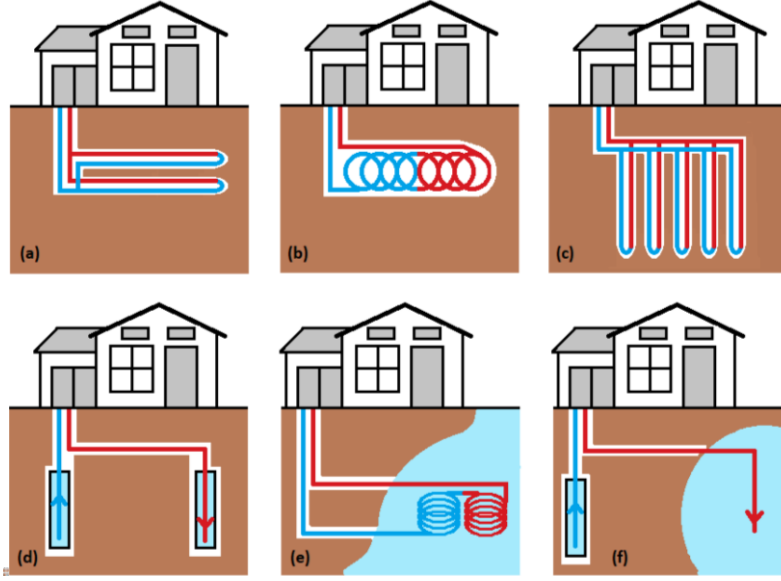
- ✓ Isı pompası çeşitli doğal kaynaklardan güneş enerjisini soğurduğu için ücretsiz bir ısı kaynağı olan topraktan yararlanır.
- ✓ Verimleri yüksektir.
- ✓ Petrol veya LPG'ye kıyasla, ısıtma faturalarından önemli ölçüde (%30 ile %50 arasında) tasarruf sağlanabilir.
- ✓ Hükümetler tarafından teşvik edilen yenilenebilir bir ısıtma seçeneğidir.
- ✓ Çok fazla bakım veya servis gerektirmeyen pratik bir uygulamadır.
- ✓ İşletme maliyetleri düşüktür.
- ✓ Yakıt fiyat değişikliklerine veya enerji güvenliği tehditlerine duyarlı değildir.
- ✓ Yakıt kullanıldığında olduğu gibi yangın riski olmadığından güvenli bir seçenektir.
- ✓ Gürültü seviyeleri düşüktür.
- ✓ Verimliliği daha da artırmak ve maliyetleri azaltmak için diğer yenilenebilir teknolojilerle birlikte kullanılabilir.



Görsel 2. Toprak Kaynaklı Isı Pompasının (GSHP) Başlıca Bileşenleri

2.2. Zemin Isı Değiştirici Tasarımları

GSHP için ısı değiştiriciler; kapalı yatay devre, kapalı slinky devre, kapalı dikey devre, açık kuyu devresi, kapalı su devresi ve açık devre kuyu ve yüzey gövdesi gibi farklı tasarımlarda düzenlenmektedir (Görsel 3).

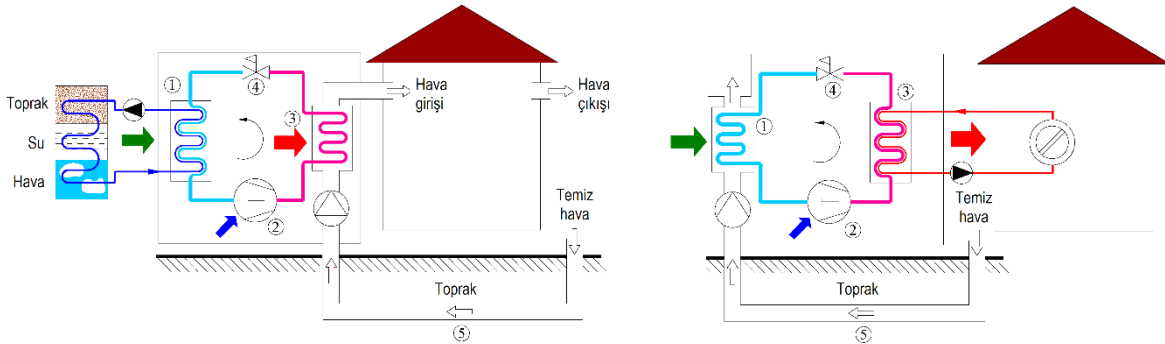


Görsel 3. Toprak Kaynaklı Isı Pompaları (GSHP) İçin Farklı Isı Değiştirici Düzenlemeleri: (A) Kapalı Yatay Devre, (B) Kapalı Slinky Devre, (C) Kapalı Dikey Devre, (D) Açık Kuyu Devresi, (E) Kapalı Su Devresi Ve (F) Açık Devre Kuyu Ve Yüzey Gövdesi

2.2.1. Yatay Isı Değiştirici Tasarımları

Yatay tasarımlar, havadan toprağa ısı değiştiricilerde ve ısı pompası sistemine bağlı yatay zemin ısı değiştiricilerinde zemin ısı enerjisinin doğrudan kullanımını içerir. Her iki sistem türü de, performansın mevsimsel toprak sıcaklığı ve nem içeriğindeki değişikliklerden etkilendiği yüzey toprak katmanlarına kurulur. Yerel jeolojik koşullar, özellikle zemin ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi, yeraltındaki ısı transferini etkiler.

Topraktan havaya ısı ısı değiştiriciler, yenilenebilir yeraltı enerjisinin kullanımı dikkate alındığında en basit ısı değiştirici tasarımıdır. Genellikle EAHE, GAHE veya HAGHE olarak kısaltılırlar. Burada ek H harfi yatay kurulumu belirtir. Açık sistem tasarımında, ortam havası zemine yerleştirilmiş borulardan geçer ve zeminle ısı transferi yapar. Mevsime bağlı olarak hava, havalandırma sistemi aracılığıyla dağıtılmadan veya bir hava kaynaklı ısı pompası (ASHP) için ısı kaynağı olarak kullanılmadan önce ısıtılır veya soğutulur (Görsel 4). EAHE, duvarların içi boş prefabrik yapı bileşenleri olarak inşa edildiği veya boruların duvarların içine yerleştirildiği ısılar olarak aktive edilen bina sistemlerinin (TABS) bir parçası olarak da kullanılabilir. Bu tür sistemlerde, kapalı devre bir yapılandırma kullanılabilir.



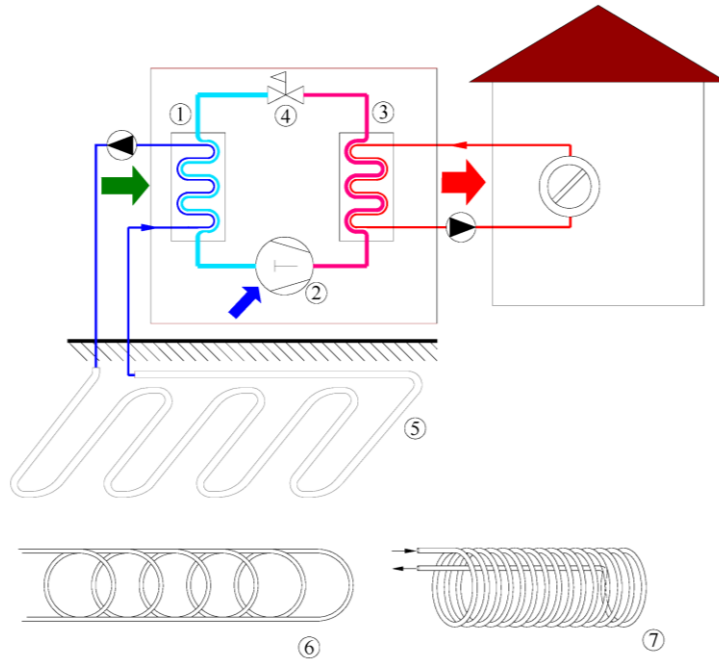
Görsel 4. Havalandırma Sisteminde Hava Beslemesi İçin Kullanılan Toprak-Hava Isı Değiştiricisi (Sol) Ve Hava Kaynaklı Isı Pompasına (ASHP) (Sağ) Bağlanmıştır: (1-

Buharlaştırıcı, 2-Kompresör, 3-Yoğuşturucu, 4-Genleşme Vanası, 5-Topraktan Havaya Isı Değiştiricisi) (Boban Ve Ark., 2021)

Yatay zemin ısı değiştiriciler, kapalı bir sistem olarak kullanılır ve ısı pompasına bağlanır. Toprak, boruların içindeki çalışma akışkanıyla ısı enerjisi transfer yapar. 1-2 m derinliğindeki hendeklere kuruldukları için performansları dikey GSHP sistemlerine kıyasla daha düşüktür. Yatay sistem için gereken kurulum alanı daha büyüktür, ancak kurulum maliyetleri dikey ısı değiştiricilere kıyasla daha düşüktür. Boru döngüsü geometrisine bağlı olarak, yatay sistemler doğrusal döngü, spiral bobin ve slinky bobin tasarımlarına ve döngü bağlantılarına bağlı olarak sistem hendek, seri ve paralel tasarımlara ayrılabilir (Görsel 5). Dikey tasarımlara kıyasla, bobin tasarımları daha uzun borular ve uzun süre pompa çalışması gerektirir. Böylece, mevcut zeminin daha verimli kullanılmasını sağlar.

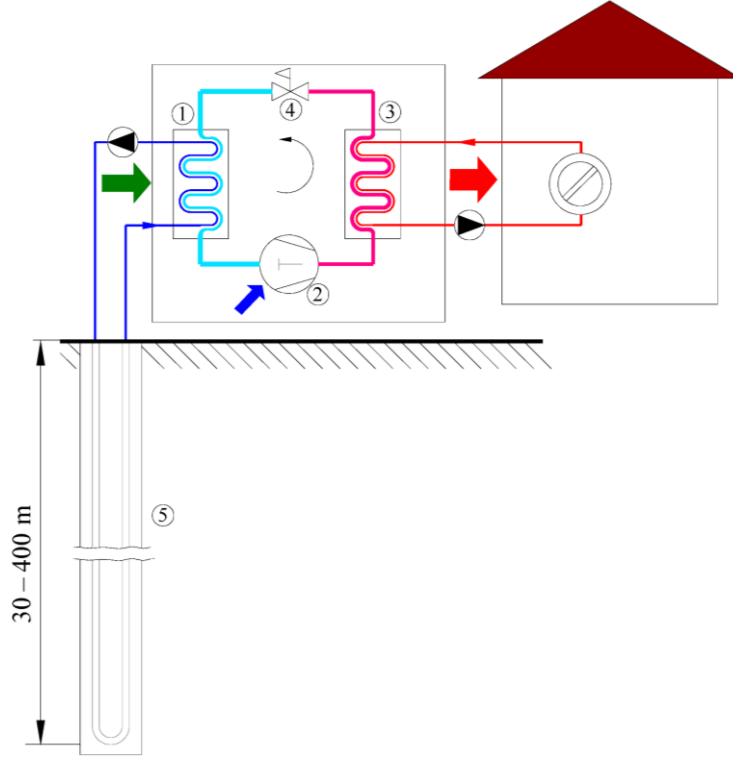
2.2.2. Dikey Isı Değiştirici Tasarımları

Belirtildiği gibi, yeterli zemin alanı mevcut olduğunda, yatay GSHP en uygun maliyetli seçenektir. Ancak, mevcut alan sınırlıysa, zemin yüzeyi kayalıksa ve manzarayla görsel bir etkileşim hoş karşılanmıyorsa, dikey GSHP uygulanır. Dikey zemin ısı değiştiriciler (VGHE), sondaj borusu ısı değiştiricileri (BHE) olarak da adlandırılır. Yatay GSHP'na kıyasla, BHE daha yüksek kurulum maliyetlerine ve daha istikrarlı performansa sahiptir. Çünkü ortam havasından ciddi şekilde etkilenmezler.



Görsel 5. Isı Pompasına Bağlı Yatay Isı Değiştirici: 1-Buharlaştırıcı, 2-Kompresör, 3-Yoğuşturucu, 4-Genleşme Valfi, 5-Doğrusal Döngü, 6-Slinky Serpantin, 7-Spiral Serpantin (Boban Ve Ark., 2021)

Dikey GSHP, sondaj kuyusunun derinliğine ve dolayısıyla ısı değiştirici tipine bağlı olarak iki gruba ayrılır. İlk grup, sığ sondaj kuyuları GHE (<400 m), genellikle ısı pompalarıyla (toprak bağlantılı ısı pompaları-GCHP) ısı enerjisi kaynağı veya soğurucu olarak birlikte kullanılır (Görsel 6).



Görsel 6. Isı Pompasına Bağlı Dikey Sondaj Kuyusu Isı Değiştiricisi: 1-Buharlaştırıcı, 2-Kompresör, 3-Yoğuşturucu, 4-Genleşme Vanası, 5-Sondaj Kuyusu Isı Değiştiricisi (Boban ve Ark., 2021)

Geleneksel bir tasarım, genellikle yaklaşık 100–200 mm çapında bir sondaj kuyusundan oluşur ve çalışma akışkanının dolaşması için 19–38 mm aralığında bir çapa sahip U boruları bulunur. En yaygın tek U boru tasarımının yanı sıra, kullanılabilen diğer tasarımlar çift veya üçlü U boru, W şekilli boru, koaksiyel boru ve helezon şekilli borudur. Sondaj kuyusunun kesitine, borular ve zemin arasındaki ısı direnci azaltan ve malzemeler arasında iyi temas sağlayan harç adı verilen çeşitli dolgu malzemeler doldurulur. Bu tür sistemlerin ısı transfer alanı sınırlı olduğundan, sonuç olarak bu sistemlerin ısı kapasitesi (ısı gücü) de sınırlıdır. Bu tür sistemlerin daha yüksek bir ısı kapasiteye ulaşması için; 1) sondaj kuyusu sayısını artırmak (günümüzdeki tesislerin çoğu) veya 2) sondaj kuyusu derinliğini artırmak olmak üzere iki olası çözüm vardır. Sondaj kuyusu sayısını artırmak, sadece yeterli alan mevcut olduğunda mümkündür.

Zemin ısı değiştiricisi (GHE) ısı kapasitesini artırmak için ikinci seçenek, aynı zamanda dikey BHE'nin ikinci kategorisi olarak da sınıflandırılabilen, derin sondaj kuyusu ısı değiştiricileri (DBHE) teknolojisini kullanır. DBHE, yüksek sıcaklıklarda orta-derin jeotermal enerji elde edebilir. Derin sondaj kuyusu ısı değiştiriciler (DBHE), elde edilen ısı doğrudan (ısı pompası yardımı olmadan) kullanılabilme olasılığının olduğu sistemlerdir. DBHE teknolojisi kullanıldığında, klasik U-borulu tasarımlar genellikle daha geniş bir ısı transfer alanına sahip ve daha yüksek akış hızını (daha düşük pompalama maliyetleri) sürdürebilen koaksiyel (boru içinde boru) sondaj kuyusu ısı değiştiricileri ile değiştirilir. Jeotermal projenin toplam maliyetinin %50'sinden fazlası sondaj maliyetleri olabileceğinden, yüksek sondaj maliyetlerini azaltmak için iyi bir çözüm, son zamanlarda kapsamlı bir şekilde araştırılan tükenmiş ve terk edilmiş gaz ve petrol kuyularının kullanılmasıdır. DBHE'de ulaşılan sıcaklığa

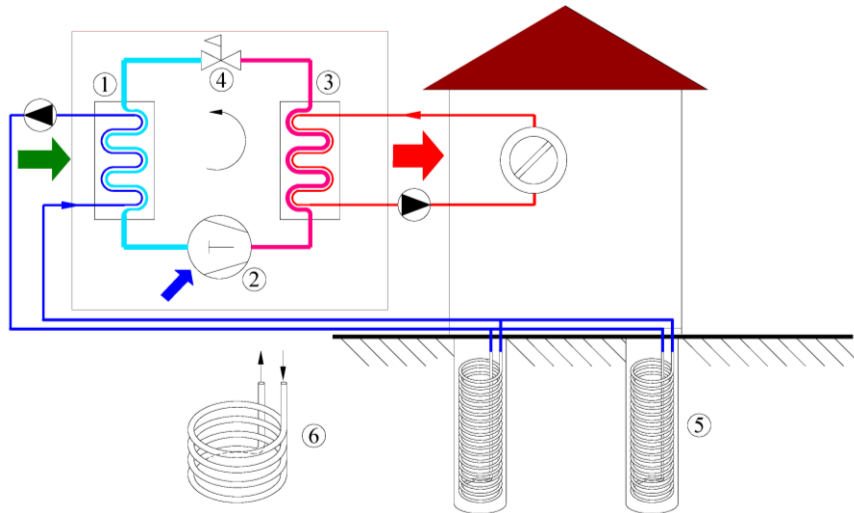
bağlı olarak, bu sistemler doğrudan alan ısıtması, ısı pompalarıyla birlikte veya hatta güç üretim sistemlerinde kullanılabilir.

2.2.3. Sığ Isı Değiştirici Tasarımları

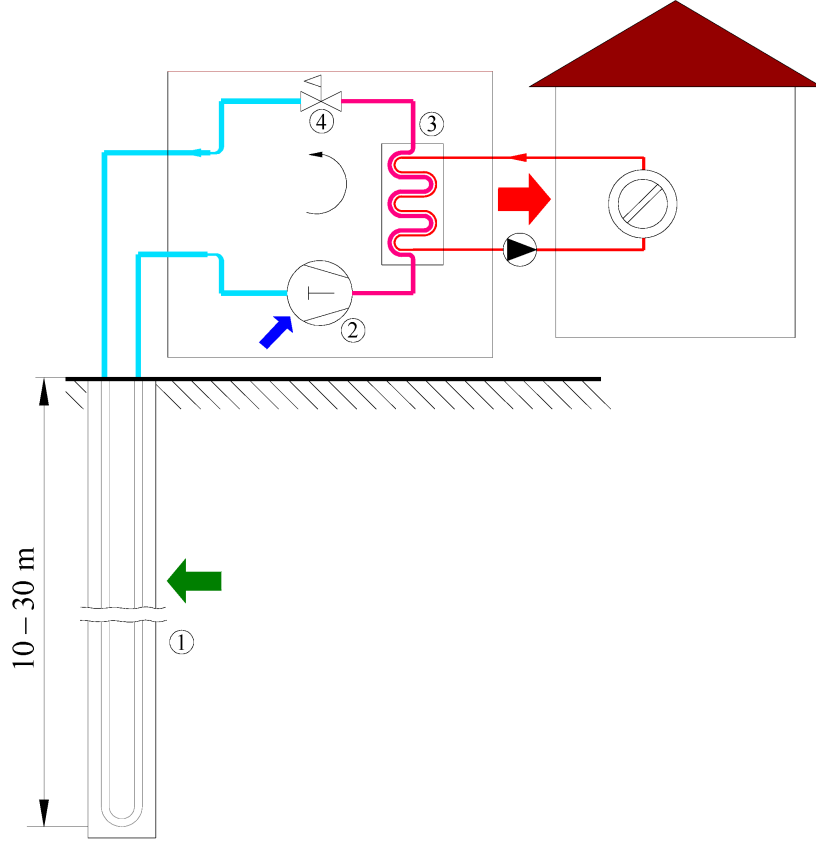
En yaygın GSHP tasarımları arasında yatay ve dikey tasarımlar yer alır. İlki düşük kurulum maliyetlerine, ikincisi ise zemin sıcaklığı kararlılığı nedeniyle üstün ısıl performansa sahiptir. Bu arada, sığ sistemler her iki sistemin avantajlarına da sahiptir. Daha az masraflı kazı çalışmaları ve yüzey koşullarının etkisinin sönümlendiği zemin katmanlarının kullanımı üstünlükleri vardır. Bu GHE düzeninin uygulanması, artan zemin sıcaklığı ve sınırlı kurulum alanı olan kentsel ortamlarda veya akiferlerin bozulmasını önlemek için derin sondajın yasak olduğu yerlerde ilgi çekicidir. Sığ sistemler, ısı transfer alanını artırmak için büyük çaplı, konik veya helezon şekilli tasarımlar veya bina kazıklarına (enerji kazıkları) gömülü borular içerir (Görsel 7).

2.2.4. Doğrudan Genleşmeli Sistemler

Doğrudan genleşme (DX) sistemlerinin kullanılması için toprak sıcaklık profilleri ve ısı özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu özelliklerin gelişmiş kontrol sistemleriyle iş birliği içinde modellenmesi ve bazı tasarım zorluklarının üstesinden gelinmesi, doğrudan genleşme (DX) sistemlerinin kullanımı için bir ön koşuldur. Daha önce belirtilen, genellikle dolaylı ısı pompası ikincil devresi olarak kullanılan su veya glikol karışımli ısı değiştiriciler ile karşılaştırıldığında, DX sistemleri, çalışma akışkanı ısı pompası soğutucu akışkanı olan bir ısı pompasının buharlaştırıcıları veya yoğuşurucuları olarak işlev görür (Görsel 8). Bu kurulum, akışkan halkaları arasında bir ısı değiştiriciye ve bir sirkülasyon pompasına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Soğutucu akışkanın DX'ine sahip bir yer ısı değiştirici tasarımı, soğutucu akışkan türü, soğutucu akışkan şarjı, kompresöre yağ dönüşü, dikey sondaj kuyusu ısı değiştiricinin derinliği ve soğutucu akışkan sızıntısından kaynaklanan olası toprak kirliliği ile ilgili bazı özel kurallara uymalıdır. Zemin ısı değiştirici yatay, dikey veya eğimli bir şekilde yerleştirilebilir. Dikey tasarımlı ısı değiştiriciler yaygın olarak kullanılır.



Görsel 7. Isı Pompasına Bağlı Sığ Isı Değiştirici: 1-Buharlaştırıcı, 2-Kompresör, 3-Yoğuşurucu, 4-Genleşme Valfi, 5-Enerji Kazıkları, 6-Büyük Çaplı Serpantin GHE)
(Boban Ve Ark., 2021)



Görsel 8. Doğrudan Genleşmeli Sondaj Kuyusu Isı Değiştiricisi: 1-Buharlaştırıcı/BHE, 2-Kompresör, 3-Yoğuşturucu, 4-Genleşme Valfi (Boban Ve Ark., 2021)

3. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Jeotermal enerji, küresel enerji sürdürülebilirliği ve çevre korumasını sağlamada alternatif bir enerji kaynağı olarak büyük potansiyele sahip, yaygın olarak bulunan ve sürekliliği olan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Binaların ısıtılması veya soğutulması söz konusu olduğunda, verimli sistem performansı için en önemli bileşen bir zemin ısı değiştiricidir (GHE). Kurulum türüne göre yatay, dikey, sıg ve DX sistemleri olmak üzere çeşitli GHE seçenekleri mevcuttur. GHE'lerin incelenmesinde en yaygın çalışma türü sayısal simülasyonlardır. Sayısal simülasyonları, sayısal ve deneysel oranının GHE sisteminin uygulama basitliği ve maliyetiyle yakın ilişki içinde olduğu saha ve laboratuvar deneyleri ve analitik çalışmalar izler. Sayısal çalışmalar çoğunlukla GHE'nin durağan veya yarı-geçiş koşullarındaki performansını inceler. Dinamik veya geçiş simülasyonu yapıldığında ek sonuçlar çıkarılabilir. Örneğin, yatay GHE sistemlerindeki boru malzemesinin durağan koşullara bağlı olarak ısı performans üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi varken, çalışmalar boru malzemesinin toprak ısı doygunluğu üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çoğu çalışmanın sadece GHE ısı performansını araştırdığı ve ısı performans ile pompa/fan gücünün akışkan hızı, boru çapı, boru uzunluğu, boru pürüzlülüğü vb. faktörlerden farklı şekilde etkilenmesi nedeniyle sonuçların yanıltıcı olabileceği de belirtilmektedir. GHE ortak bileşenleri, çalışma akışkanları, borular (boyutlar, malzemeler ve düzenlemeler) ve dolgu ve enjeksiyon malzemeleridir. Bunlar aynı zamanda daha iyi ısı performans sağlamak için iyileştirilebilecek değişkenlerdir. GHE ısı performansının iyileştirilmesi, etkili faktörler değerlendirilerek yapılabilir. Ancak bazı sınırlamalar dikkate alınmalıdır. En önemli sınırlamalardan biri, malzemenin bulunabilirliği ve

fiyatıdır. Çünkü maliyet ekonomik açıdan haklı çıkarılamıyorsa, kullanımın bir anlamı yoktur. Çevresel etki, dayanıklılık ve uygulanabilirlik gibi diğer sınırlamalar da dikkate alınmalıdır.

Dolgu harcının ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi, topraktan çalışma akışkanına ısı transferini artırır. İyi ısı iletkenliğin yanı sıra, enjeksiyon harcı düşük geçirgenliğe ve kendi kendini kapatma için uygun özelliklere sahip olmalı ve BHE'nin mekanik kararlılığını sağlamalıdır. Diğer taraftan, enjeksiyon harcı iyileştirmesi dikkatli ve ekonomik bir şekilde yapılmalıdır. Malzeme maliyetini analize dahil etmek çok önemlidir. Çünkü ısı iletkenliği iyileştirmek daha yüksek sermaye maliyetine neden olabilir ve GHE'nin ısı performansı sınırsız bir şekilde iyileştirilemez. Harç iyileştirmesi, ısı performans üzerinde asimptotik bir etki gösterir ve bazı durumlarda U-borulu BHE'deki ısı kısa devre nedeniyle performansı azaltabilir. Son yıllarda yapılan çalışmaların çoğu, geleneksel bentonit ve çimento karışımlarına kıyasla modern PCM malzemelerine odaklanmıştır. Gizli ısı depolama için kullanılan PCM, halka ve çevresindeki toprak sıcaklığı dalgalanmalarını azaltarak GHE performansını olumlu yönde etkiler.

Çalışma akışkanlarına gelince, doğrudan genleşme sistemlerindeki soğutucu akışkanlar, dolaylı sistemlerdeki çalışma akışkanlarına göre daha iyi ısı performans gösterir. Geleneksel olarak, dolaylı sistemlerde, yüksek ısı özellikleri, ihmal edilebilir çevresel etkisi ve düşük fiyatı nedeniyle su tercih edilen GHE çalışma akışkanıdır. Düşük sıcaklıklarda çalışma akışkanının donmaması gerekir. Bu nedenle su genellikle glikol karışımlarıyla değiştirilir (karıştırılır). Yeni çalışmaların çoğu, baz akışkandaki nanopartiküllerin bir kombinasyonu olan nanoakışkanlara odaklanmıştır. %0,1 kütle gibi çok düşük konsantrasyonlarda gelişmiş ısı özellikler gösterirler ve %1 kütleden fazla konsantrasyonlarda nadiren kullanılırlar. Nanoakışkanlar ısı performans açısından büyük bir potansiyele sahip olmalarına rağmen, olumsuz yönleri (daha fazla basınç düşüşü, daha yüksek fiyat ve sızıntı nedeniyle nanoakışkan kaybı) yaygın kullanım alanını sınırlar.

GHE boruları kimyasal olarak kararlı (doğrudan genleşme sistemleri için bakır borular), korozyona dayanıklı ve iyi ısı iletkenliğine sahip, kullanımı kolay olmalıdır. GHE derinliğinin ve ısı değişim alanının iyileştirilmesi, GHE kararlılığını ve performansını artırır. Ancak aynı zamanda sermaye ve işletme maliyetlerini artırır ve zeminin uzun süreli kararlılığı sorusunu gündeme getirir. Borularda yapısal iyileştirmeler yapılırken, genellikle önemli sınırlamalar getirebilen hidrolik ve basınç özelliklerinin analiz edilmesi önemlidir. Doğru boru malzemesini seçmek, GHE performansını artırabilir ve kurulum maliyetlerini azaltabilir. Isı edeğiştiricinin türüne bağlı olarak, boru malzemesinin ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi GHE performansını artırabilir veya performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olmayıp sadece yatırım maliyetini artırır.

Yatay GHE sistemlerinin tasarımına gelince, borular arasında daha fazla boşluk, gelişmiş çok borulu tasarımlar veya spiral tasarım, ikincil kaplama toprağı ve nem tutma, GHE'nin ısı performansını iyileştirir. Kurulum derinliği, sadece zemin özelliklerinde önemli bir fark varsa etkili bir değişkendir. Mevsimsel sıcaklık değişimleri, sığ topraktaki GHE performansını önemli ölçüde etkilemez. Enerji kazıkları ve sepet tasarımları da dahil olmak üzere sığ GHE sistemleri, daha kararlı yeraltı koşulları ve dikey tasarımlara göre daha uygun maliyetli kurulumları nedeniyle giderek daha popüler hale gelmektedir. Bobin tasarımları daha

büyük bir basınç düşüşüne sahiptir, ancak bu, daha büyük iç boru çapı ve spiral tasarımlı bir bobin çapı ile telafi edilebilir. Helis eğiminin etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Dikey GHE sistemleriyle ilgili yeni gelişmeler, ısıl performansı iyileştirmek ve sondaj deliğini azaltmak için çeşitli yeni geometriler ve kanatçıklar kullanarak klasik U-boru düzenlemelerini daha da iyileştirmeye çalışmakta ve böylece yüksek sondaj maliyetlerini azaltarak GSHP teknolojisini ticari olarak daha da erişilebilir hale getirebilmektedir. Derin sondaj borusu ısı değiştiricilerin kısmen yeni uygulaması, sığ BHE'den daha iyi performans sundukları için büyük bir potansiyel göstermiştir. Akışkan akış hızının, akışkan giriş sıcaklığının doğru seçilmesi, iç borunun yalıtımının artırılması ve dış borunun zemine yakın yalıtılması, sondaj borusunun derinliğinin artırılması ve çap oranının doğru seçilmesi, DBHE'nin daha iyi ve daha verimli bir performans göstermesinin anahtarıdır. Yüksek sondaj maliyetlerinden kaçınmak için, terk edilmiş ve tükenmiş petrol ve gaz kuyularının yeniden canlandırılması önerilmektedir.

Doğrudan genleşmeli sistemlerin kullanımı, dolaylı tasarımlara kıyasla sınırlıdır. Ancak enerji verimliliği performansları geleneksel ısı pompası sistemlerinden daha iyidir. Bilimsel literatürde, DX sistemlerinin gerekçeleri ayrıntılı olarak araştırılmamıştır. Soğutucu akışkan şarjı, ikincil sistemlere kıyasla çok daha yüksektir. Olası soğutucu akışkan sızıntısı ve zemindeki yağ kirliliği ciddi ekolojik sorunlardır. Önerilen soğutucu akışkan hızına ulaşmak için BHE boyut seçimi, kompresöre yağ dönüşünü, kompresörün kısmi işini ve doğrudan genleşmeli BHE'lerin paralel bağlantısı için soğutucu akışkan akış dağılımını garanti altına alır ve doğrudan genleşme sistemlerinin yaygın kullanımından önce çözüm gerektiren zorluklardan sadece birkaçıdır.

Farklı GHE tasarımlarının ısıl performansını iyileştirmenin farklı yöntemleri vardır. Yine de, pratik nedenlerden dolayı (mevcut ticari ürünler, boyutlandırma güvenilirliği vb.) malzeme, boru çapları ve çalışma akışkanları açısından ortak tasarımlar baskındır. Yeni bir tasarım önerildiğinde değerlendirilmesi gereken önemli bir konu, bu tasarımın yaygın olarak kullanılan boyutlandırma ve bina simülasyon araçlarına uygulanabilirliğidir. Günümüzde, sadece geleneksel dikey sondajlı ısı değiştiriciler için ticari olarak mevcut araçlar ayrıntılı olarak karşılaştırılmakta ve analiz edilmektedir. Daha ileri araştırmaların bir diğer alanı da, yerinde yeraltı ısı özellikleri ve bina yükleriyle güçlü bir şekilde bağlantılı olan GHE sistemlerinin operasyonel değişkenleri ve optimum kontrolüdür. GHE tasarımının sadece ısıl performansa dayalı olarak karşılaştırılması, özellikle GHE ısı pompası sistemine bağlıysa yanıltıcı olabilir. GHE tasarımının daha fazla iyileştirilmesi için, yatırım ve işletme maliyetlerinin yanı sıra işletme değişkenlerinin etkisini de içeren yeni araştırmalar yapılmalıdır.

Üstünlüklerine rağmen, ısı pompalarının yaygın olarak benimsenmesi, yüksek ilk yatırım maliyetleri, eski binalarda iyileştirme zorlukları ve şebeke kapasitesi sınırlamaları gibi teknik ve ekonomik engellerle karşı karşıyadır. Benimsemeyi hızlandırmak için sübvansiyonlar, performans standartları ve altyapı yatırımları yoluyla politika desteği şarttır. Sonuç olarak, ısı pompaları bina sektörünün karbonsuzlaştırılmasının temel bir unsurudur. Diğer sürdürülebilir teknolojiler ve destekleyici politika çerçeveleriyle entegrasyonları, iklim hedeflerine ulaşmak ve dünya çapında enerji verimli, düşük emisyonlu ısıtma sistemlerini teşvik etmek için kritik öneme sahip olacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Boban, L.; Miše, D.; Herceg, S.; Soldo, V. Application and Design Aspects of Ground Heat Exchangers. *Energies* 2021, 14, 2134. <https://doi.org/10.3390/en14082134>.
- [2] Rossi di Schio, E.; Ballerini, V.; Dongellini, M.; Valdiserri, P. Defrosting of Air-Source Heat Pumps: Effect of Real Temperature Data on Seasonal Energy Performance for Different Locations in Italy. *Appl. Sci.* 2021, 11, 8003.
- [3] Zelazna, A.; Pawłowski, A. Review of the Role of Heat Pumps in Decarbonization of the Building Sector. *Energies* 2025, 18, 3255. <https://doi.org/10.3390/en18133255>.

**AKILLI ENJEKSİYON KALIPLAMA SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ: MOBİL
ENTEGRASYONLU İNSAN-MAKİNE ARAYÜZÜ (HMI) VE HASSAS KOVAN
SICAKLIK KONTROLÜ**

Muhammed Talha ALTUN¹

Erciyes Üniversitesi,
mtalhaaltun@erciyes.edu.tr - <https://orcid.org/0009-0001-0785-1225>

Doç. Dr. Bülent KAYA

Erciyes Üniversitesi,
bulentkaya@erciyes.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7943-8683>

ÖZET

Son yıllarda, enjeksiyon kalıplama yönteminin 3B baskı teknolojileri ile entegrasyonu, parçaların düşük adetli ve maliyet etkin üretimi için önemli bir alternatif haline gelmiştir. Ancak, çeliğe kıyasla tipik olarak daha düşük ısı iletkenliğe sahip olan 3B baskılı kalıpların kullanımında, mühendislik termoplastiklerinin işlenebilmesi için hassas sıcaklık kontrolünün sağlanması esastır. Bu amaçla özelleştirilebilir yapıdaki "Tam Elektrikli Mini Plastik Enjeksiyon Makinesi" (TEMPEM) tasarlanmış ve prototipi üretilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, TEMPEM ocak (barrel) kontrolü için modüler bir İnsan-Makine Arayüzü (HMI) geliştirilerek sistem üzerinde test edilmiştir. Kontrol sistemi; üç bağımsız 250 W kelepçe rezistansı yönetmek üzere bir Arduino Nano 33 IoT, Katı Hal Röleleri (SSR) ve MAX6675 termokupl yükseltici modüllerinden oluşmaktadır. Geleneksel PID denetleyicilerin aksine bu çalışmada, ısı davranışının simülasyonu ve optimum ısıtıcı gücünün tahmini için Model Öngörülü Kontrol (MPC) teorisi kullanılmıştır. Bu yaklaşımla, sıcaklık dalgalanmalarının minimize edilmesi ve sensör gürültüsüne karşı sistem direncinin artırılması hedeflenmiştir.

Geliştirilen kontrol sisteminin, Android tabanlı akıllı cihazlarla uyumlu ve taşınabilir olması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Unity 3D platformu kullanılarak Wi-Fi soket haberleşmesi üzerinden çalışan bir HMI geliştirilmiştir. Bu arayüz ile kullanıcı gerçek zamanlı izleme ve kontrol yapabilirken, aynı zamanda Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarına uygun, kişiselleştirilebilir bir protokol de sisteme entegre edilmiştir. Önerilen bu sistem; akademik araştırmalar ve küçük ölçekli imalat süreçleri için esnek, düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hızlı Kalıplama, Isıl Kontrol, İnsan-Makine Arayüzü (HMI), Kablosuz Kontrol Sistemleri, Nesnelerin İnterneti (IoT)

¹ Sorumlu yazar: Muhammed Talha ALTUN, mtalhaaltun@erciyes.edu.tr

SMART INJECTION MOLDING SYSTEM DEVELOPMENT: MOBILE- INTEGRATED HMI AND PRESCISE BARREL TEMPERATURE CONTROL

ABSTRACT

In recent years, the integration of injection molding with 3D printing technologies has emerged as a significant alternative for low-volume and cost-effective production. However, in the use of 3D-printed molds—which typically exhibit lower thermal conductivity compared to steel—precise temperature control is essential for the successful processing of engineering thermoplastics. For this purpose, a customizable "Fully Electric Mini Plastic Injection Machine" (TEMPEM) was designed and its prototype was manufactured.

Within the scope of this study, a modular Human-Machine Interface (HMI) was developed for the control of the TEMPEM barrel and tested on the system. The control system consists of an Arduino Nano 33 IoT, Solid-State Relays (SSRs), and MAX6675 thermocouple amplifier modules to manage three independent 250 W band heaters. In contrast to traditional PID controllers, this study utilizes Model Predictive Control (MPC) theory for the simulation of thermal behavior and the estimation of optimum heater power. This approach aims to minimize temperature fluctuations and enhance the system's robustness against sensor noise.

The developed control system is designed to be portable and compatible with Android-based smart devices. To this end, an HMI communicating via Wi-Fi socket communication was developed using the Unity 3D platform. While this interface allows users to perform real-time monitoring and control, a customizable protocol suitable for Internet of Things (IoT) applications has also been integrated into the system. Consequently, the proposed system offers a flexible, low-cost, and high-precision solution for both academic research and small-scale manufacturing.

Keywords: Rapid Tooling, Thermal Control, Human-Machine Interface (HMI), Wireless Control Systems, Internet of Things (IoT)

1. GİRİŞ

Polimer işleme teknolojilerinin temel taşı olan plastik enjeksiyon kalıplama, karmaşık geometrili parçaların yüksek hassasiyetle ve seri olarak üretilmesini sağlayan endüstriyel bir yöntemdir. Geleneksel enjeksiyon kalıplama süreçlerinde takım çeliğinden üretilen yüksek maliyetli kalıplar kullanılmaktadır. Ancak günümüzde Hızlı Prototipleme ihtiyacının artmasıyla birlikte, 3B baskı teknolojileri kullanılarak üretilen polimer/reçine esaslı kalıplar endüstride yaygınlaşmaya başlamıştır [1]. Bu kalıpların en büyük dezavantajı, düşük ısı iletkenlikleri ve yüksek sıcaklık dalgalanmalarına karşı çelik kalıplar kadar dirençli olmamalarıdır. Ayrıca düşük mukavemetleri nedeniyle yine, endüstriyel bir plastik enjeksiyon makinesinde kullanım olanakları sınırlıdır. Ancak, 3B baskı ile üretilen kalıplar, geleneksel çelik kalıplara kıyasla %80-90 oranında maliyet avantajı sağlayabilir ve üretim sürelerini %90

oranında kısaltabilir [2]. Bir diğer kalıplama süreci olan, Mikro kalıplama (micromolding) süreçlerinde ise eriyik plastiğin mikro boyutlu kalıp kavitelerine başarılı bir şekilde doldurulabilmesi için son derece hassas sıcaklık ve basınç kontrolü gerekmektedir [3].

Endüstriyel enjeksiyon makinelerinde sıcaklık kontrolü için uzun yıllardır Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrolcüler kullanılmaktadır [4]. Ancak PID kontrolcüler, sistemin mevcut ve geçmiş hatalarına odaklanarak işlem yaparlar ve kovan gibi yüksek "ısı ataleti" (thermal inertia) sahip sistemlerin gelecekteki tepkilerini öngöremezler [5]. Kapalı ısıtma sistemlerinde PID algoritmalarının, istenen hedef sıcaklığı yüksek oranda aştığı (overshoot) ve polimerin termal bozunmasına yol açabildiği bilinmektedir [6].

Bu çalışmada, geleneksel hidrolik makinelerin hantallığından arındırılmış, laboratuvar ortamında 3B baskı kalıplarla çalışmaya uygun, tam elektrikli mini plastik enjeksiyon makinesi "TEMPEM" için yeni nesil bir sıcaklık kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemde geleneksel PID metodolojisi yerine, sistemin fiziksel termodinamik modelini matematiksel olarak çözümleyen ve gelecekteki sıcaklık durumunu öngörerek ısıtıcı gücünü önceden optimize eden Model Öngörülü Kontrol (MPC) algoritması entegre edilmiştir.

2. OCAK ISISINDA KULLANILAN KONTROL TEORİLERİ

Bu çalışmada ocak kontrolü için PID ve MPC algoritmaları kullanılmıştır. Başlangıç olarak PID kontrol ile çeşitli deneyler yapılarak, ocağın ısı ataleti ile ilgili veriler elde edilmiş, daha sonra bu verilerle, yine PID parametre ayarları ve MPC fiziksel kontrol parametreleri bu ön kurulum deneylerinden toplanan veri analizleri ile elde edilmektedir.

2.1. PID Kontrol Teorisi

PID kontrolcü, endüstriyel otomasyon sistemlerinde en yaygın kullanılan geri beslemeli kontrol yapısıdır. Arduino üzerinde çalıştırılabilir durumda birçok PID kütüphanesi bulunmaktadır. Bu çalışmada da başlangıç olarak, Brett Beauregard Arduino kütüphanesi [7] kullanılmıştır.

Buna göre, PID kontrolün matematiksel ifadesi Denklem 1'de verilmiştir [8]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada $u(t)$ kontrol çıkışı, $e(t)$ hata sinyali (setpoint - proses değeri), K_p oransal kazanç, K_i integral kazanç ve K_d ise türev kazancıdır. Endüstriyel uygulamalarda PID parametreleri (K_p , K_i , K_d) genellikle Ziegler-Nichols [9] gibi analitik yöntemler veya operatör tecrübesine dayalı deneme-yanılma (heuristic) yaklaşımlarıyla belirlenmektedir. Bu çalışmadaki klasik PID kontrol testlerinde, karşılaşılan sistemin karmaşık ısı cevaplarından dolayı parametreler deneme-yanılma yöntemiyle ($K_p = 8.0, K_i = 0.2, K_d = 2.0$) ampirik olarak ayarlanmıştır. Sistemin yüksek ölü zamanı ($L = 70s$) nedeniyle, kullandığımız standart PID algoritması

gelecekteki ısı birikimini öngörememiş ve bu durum yüksek sıcaklık aşımalarına (overshoot) neden olmuştur. Bu zafiyet, çalışmanın temel motivasyonu olan başka bir kontrol modeli olan, Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control) algoritmasının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

2.2. Model Öngörülü Kontrol (MPC)

Model Öngörülü Kontrol (MPC), kontrol edilen sistemin matematiksel modelini kullanarak gelecekteki davranışı öngören ve optimal kontrol eylemlerini hesaplayan ileri düzey bir kontrol stratejisidir [10]. MPC algoritması her kontrol adımında sistemin modelini kullanarak bir öngörü ufkü boyunca gelecekteki davranışı simüle eder ve maliyet fonksiyonunu minimize eden optimal kontrol dizisini hesaplar [11]. Plastik enjeksiyon kovanı gibi ısı sistemlerinin termodinamik davranışı, birinci dereceden bir enerji dengesi denklemi Denklem 2 ile ifade edilmiştir [5], [12]:

$$C \frac{dT}{dt} = P \cdot u - h_a(T - T_{amb}) \quad (\text{Denklem 2})$$

Burada C ısı kapasite (J/K), T ölçülen anlık kovan sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), P maksimum ısıtıcı gücü (W), u kontrol sinyali / görev döngüsü oranı (0-1 arası), h_a ortam ısı transfer katsayısı (W/ $^{\circ}\text{C}$) ve T_{amb} ortam sıcaklığıdır. Yüksek ısıl ataletli kovan sistemlerinde, ısıtıcıya verilen elektrik enerjisi ile sensörde (termokupul) ölçülen sıcaklık artışı arasında fiziksel bir gecikme (ölü zaman, L) bulunur. Bu gecikme süresi boyunca rezistanslardan sisteme aktarılan, kovan çeliği tarafından emilen ancak henüz sıcaklık artışı olarak ölçülemeyen enerji, bu çalışmada "Boru Hattı Enerjisi" ($E_{pipeline}$) olarak tanımlanmış ve Denklem 3 ile hesaplanmıştır [13]:

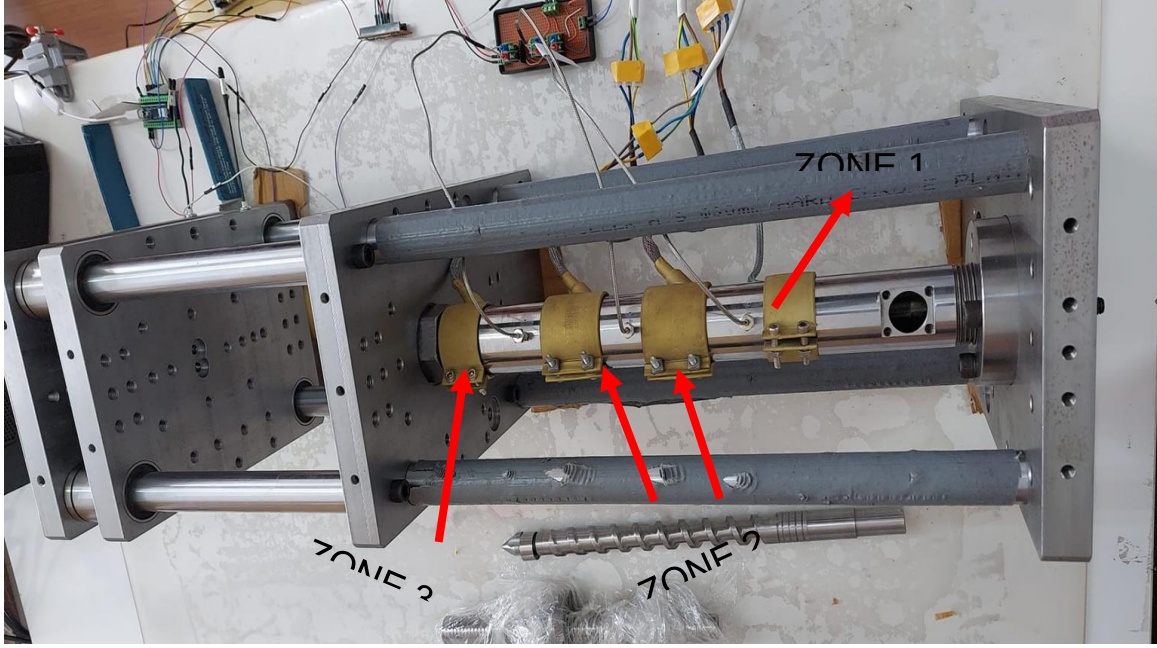
$$E_{pipeline} = \sum_{i=1}^N u_{hist}[i] \cdot P \cdot \Delta t \quad (\text{Denklem 3})$$

Burada $u_{hist}[i]$, geçmiş ölü zaman süreci boyunca uygulanan kontrol sinyallerinin hafıza dizisini; Δt , kontrol döngüsü örnekleme zamanını; N ise gecikme süresi içindeki toplam örneklem sayısını ($N = L/\Delta t$) temsil etmektedir. Sisteme uygulanan bu öngörü modeli sayesinde, hedefe ulaşmadan önce kovan içinde biriken bu artı enerji hesaba katılarak ısıtıcı gücü (u) proaktif olarak kesilmiş ve termal aşımaların (overshoot) önüne geçilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Donanım Mimarisi

Geliştirilen, Tam Enjeksiyonlu Mini Plastik Enjeksiyon Makinesinin (TEMPEM) kovan yapısı Görsel 1 'de gösterildiği gibi, üç farklı ısıtma bölgesine ayrılmıştır: Zone 1 (Besleme - 250W), Zone 2 (Orta - 500W+500W) ve Zone 3 (Nozul - 250W). Toplam ısıtma kapasitesi 1500W'tır.



Görsel 1. TEMPEM Kovan/Ocak Üzerine Yerleştirilen, Kelepçe Rezistans ve Isıtma Bölgeleri

Ocak ısısının kontrolünde Arduino Nano 33 IOT ile entegre bir şekilde çalışan, ve fonksiyonları Çizelge 1 ile verilen sistem donanımı bileşenleri kullanılmıştır.

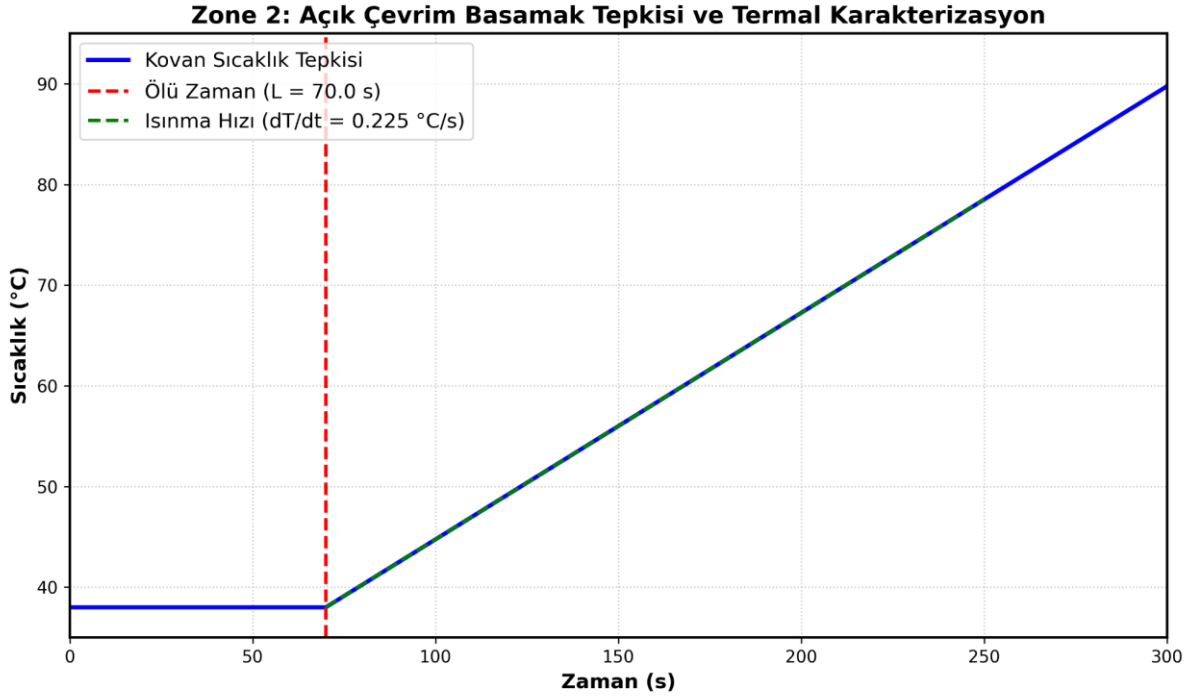
Çizelge 1. Sistem Donanım Bileşenleri

Bileşen	Model/Tip	İşlev
Mikrokontrolcü	Arduino Nano 33 IoT 33	Ana kontrol ve Wi-Fi
Termokupl Entegresi	MAX6675	K-tipi dijitalleştirme
Katı Hal Rölesi	SSR-25DA	AC yük anahtarlama
Termokupl	K-Tipi	Sıcaklık ölçümü

MAX6675 entegreleri, SPI protokolü üzerinden paralel olarak bağlanmıştır. SSR kontrol pinleri D3-D6, termokupl chip select pinleri D7-D9 olarak konfigüre edilmiştir. Bu Arduino Nano 33 pinleri ile, SSR tetiklenmesinde, 1 k Ω direnç ve NPN tipi (4 adet) transistörler yardımı ile harici bir güç kaynağı kullanılmıştır.

3.2. Termal Karakterizasyon ve Sistemin Modellenmesi

Model Öngörülü Kontrol (MPC) algoritmasının başarılı bir şekilde çalışabilmesi için, öncelikle sistemin fiziksel termal davranışının matematiksel olarak tanımlanması gerekmektedir. Kovanın en yüksek ısıl ataletine sahip olan Orta Bölgesi (Zone 2) referans alınarak açık çevrim (open-loop) basamak tepkisi testi uygulanmıştır (Görsel 2).



Görsel 2. Açık Çevrim Basamak Tepkisi Testi ve Karakterizasyon Eğrisi

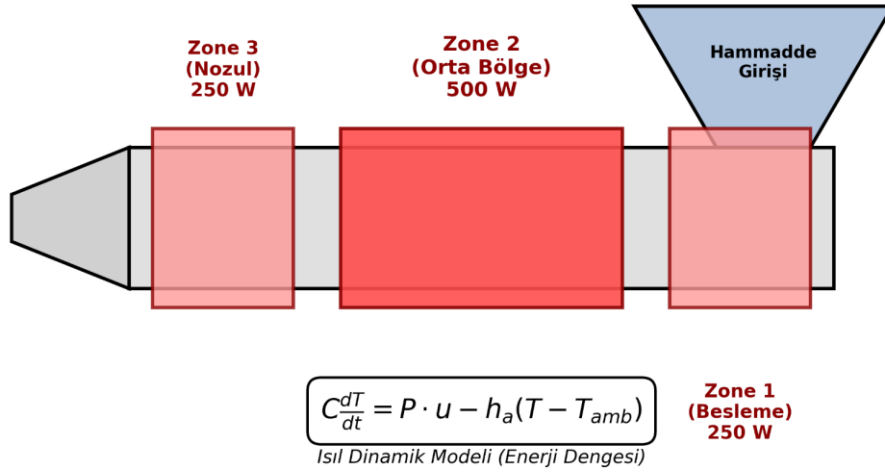
Sistem yaklaşık 38°C sıcaklığında dengeye getirildikten sonra %30 sabit ısıtıcı gücü (150W aktif güç) uygulanmış ve sıcaklık verileri 1 Hz (1 saniye) örnekleme ile kaydedilmiştir. Test sonucunda "Ölü Zaman" L 70 saniye olarak ölçülmüştür. Bu süre, ısıtıcılara güç verilmeye başlandığı an ile kovan sıcaklığının gerçek anlamda artışa geçtiği an arasındaki fiziksel iletim gecikmesidir. Deney sonucunda maksimum ısınma hızı (dT/dt) 0.225 °C/s olarak belirlenmiştir. Enerji korunumu prensibine dayanılarak Orta Bölgenin ısı kapasitesi (C) Denklem 4 ile hesaplanmıştır:

$$C = \frac{P_{uygulanen}}{dT/dt} = \frac{150 \text{ W}}{0.225^\circ\text{C/s}} = 666.7 \text{ J/K} \quad (\text{Denklem 4})$$

3.3. Kontrol Algoritmaları (PID ve Fiziksel MPC)

Görsel 3 ile şematığı verilen bir plastik enjeksiyon kovanı gibi kapalı sistemlerin ısı davranışı Denklem 5 ile ifade edilebilir.

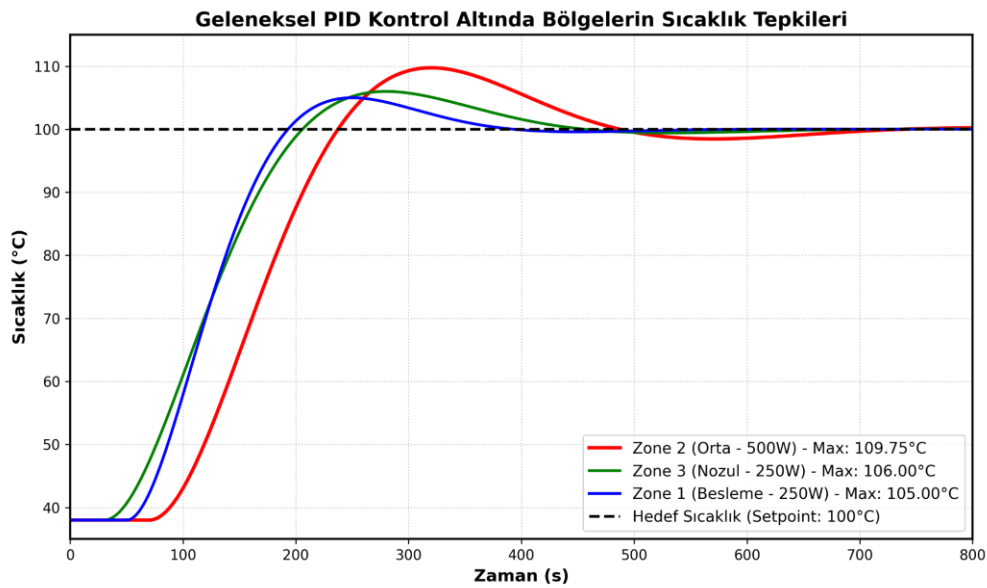
TEMPEM Enjeksiyon Kovanı Isıtma Bölgeleri ve Termal Dinamikleri



Görsel 3. Kovan Isıtma Dinamikleri ve Bölgeleri

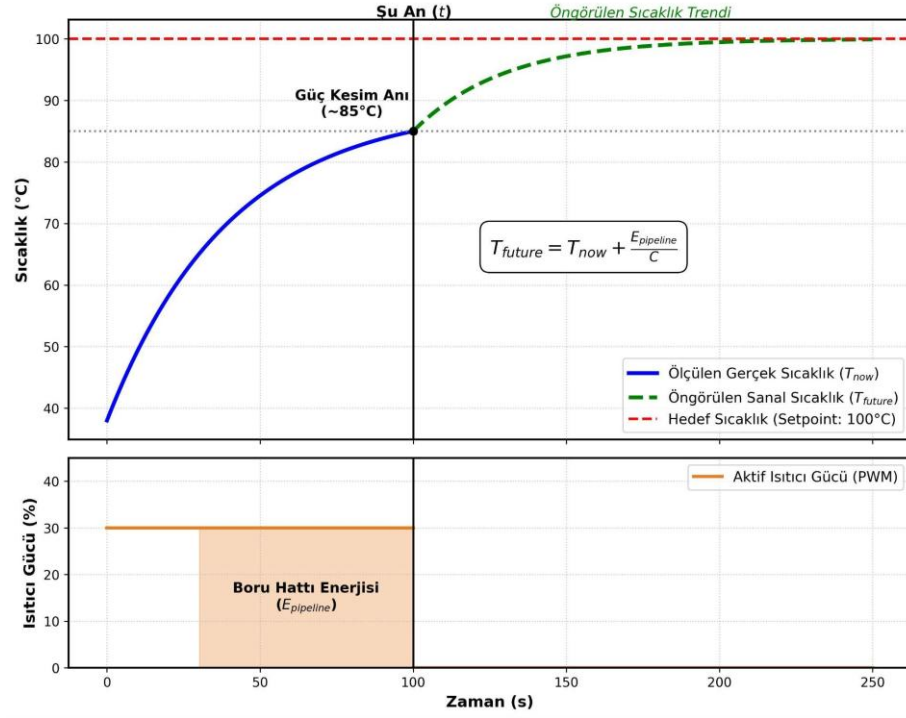
$$C \frac{dT}{dt} = P \cdot u - h_a(T - T_{amb}) \quad (\text{Denklem 5})$$

Ocak ısınısını tepkisinin gözlenmesinde, başlangıçta referans noktası oluşturması amacıyla standart bir PID kontrol uygulanmıştır. Bu amaçla, Arduino IDE tarafında Brett Beauregard [7] PID kütüphanesi kullanıldı. Ocağın yüksek ölü zamanı $L = 70s$ ve karmaşık ısı cevaplarından ötürü kontrol parametreleri ampirik deneme-yanılma (heuristic) yöntemiyle ($K_p = 8.0$, $K_i = 0.2$, $K_d = 2.0$) olarak ayarlanmıştır. Ancak, Görsel 4 ile gösterildiği üzere, kullandığımız PID algoritması, ısıtıcı kapansa bile sistemdeki ısı ataleti öngöremediği için ocak sıcaklıklarında sapmalara neden olmuştur.



Görsel 4. PID Kontrolde Sıcaklık Aşım Problemi

Bu problemin çözümü için ise, esasen günümüz 3D yazıcı nozullarında da aktif bir şekilde kullanılmakta olan Model Öngörülü Kontrol (MPC) algoritması kullanılmıştır. MPC, yüksek ısı atalet nedeniyle rezistanslardan aktarılan ancak henüz sensöre ulaşmayan "Boru Hattı Enerjisi" 'ni ($E_{pipeline}$) tahmin ederek ısıtıcı gücünü önceden kesmeyi hedeflemektedir. Ancak bunun için, öncelikle Boru hattı enerjisinin (Denklem 6) hesaplanması gerekmektedir.



Görsel 5. Model Öngörülü Kontrol Yaklaşımında Termal Öngörü

$$E_{pipeline} = \sum_{i=1}^N u_{hist}[i] \cdot P \cdot \Delta t \quad (\text{Denklem 6})$$

Kullandığımız algoritma, 1 saniyelik zaman döngülerinde gelecekteki sanal sıcaklığı;

$$T_{future} = T_{now} + \frac{E_{pipeline}}{C}$$

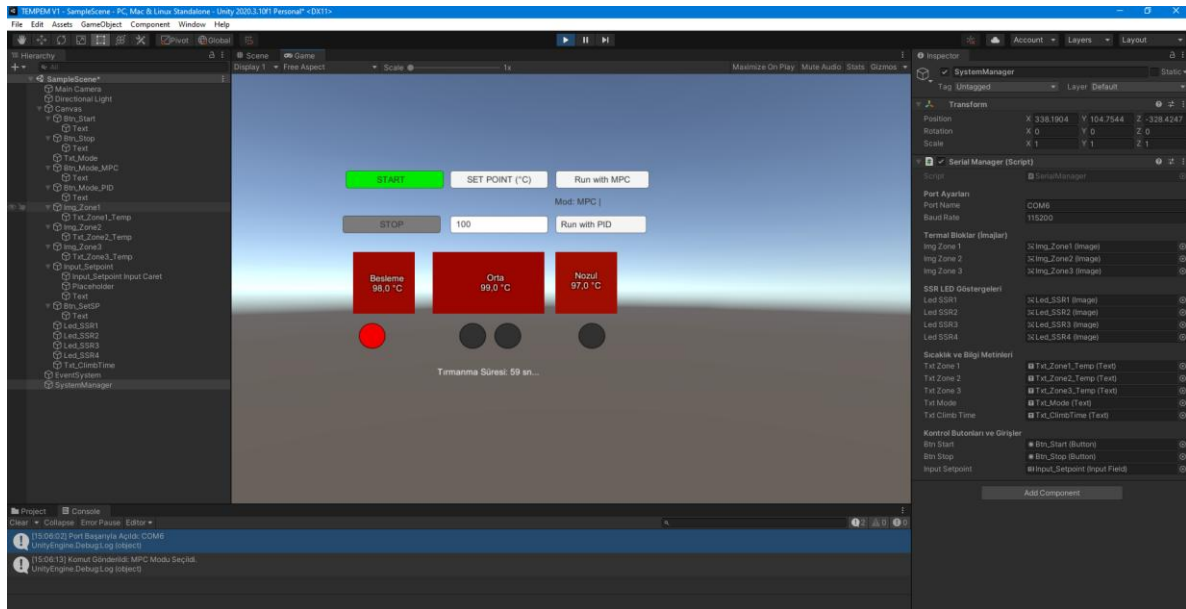
sürekli olarak hesaplamakta ve bu değer hedefe (setpoint) ulaştığı an, SSR (Solid-State Relay) ısıtıcı görev döngüsünü (Duty Cycle) zaman orantılı (Time-Proportioning) PWM ile %0'a çekmektedir. Görsel 5 ile verilen grafikte, MPC algoritmasının, 100 C°'lık hedefe ulaşmak için yaklaşık 85 C° civarında, röleleri kapattığı gözlenmektedir.

3.4. İnsan-Makine Arayüzü (HMI) Tasarımı ve Unity 3D Entegrasyonu

Geliştirilen "Tam Elektrikli Mini Plastik Enjeksiyon Makinesi" 'nin (TEMPER) tamamen akıllı

ve mobil platformlardan yönetilebilir olması amacıyla Wi-Fi haberleşme mimarisi kurgulanmıştır. Sistemin donanım merkezinde yer alan Arduino Nano 33 IoT mikrokontrolcüsü "Access Point" (AP) modunda çalıştırılarak doğrudan yerel bir Wi-Fi ağı oluşturmaktadır. Böylelikle, geliştirilen makinaya güç verildiğinde Arduino kartı "TEMPEM_MAKINESI" adında bir ağ oluşturması sağlanmaktadır. Geliştirilen İnsan-Makine Arayüzü (HMI) ile, PC/Windows tabanlı bilgisayarlar ve Android tabanlı mobil akıllı cihazlar, TCP/IP soketi aracılığıyla oluşturulan bu ağa (192.168.4.1) bağlanarak, veri transferi ve kontrol sağlanabilmektedir.

İnsan-Makine Arayüzü uygulaması için Unity 3D oyun motoru kullanılmıştır [14]. Çalışmanın başlangıç aşamasında, aşağıda Görsel 6 ile verilen arayüz taslağı kullanılmıştır. Arayüzün merkezinde, üç farklı ısıtma bölgesinin (Besleme, Orta ve Nozul) anlık sıcaklık değerlerini ve Katı Hal Rölelerinin (SSR) anlık çalışma yüzdelerini (Duty Cycle) eşzamanlı olarak yansıtan yuvarlak (image knob) oyun objeleri ile, dinamik termal bloklar bulunmaktadır. Bu termal bloklar hedef sıcaklığa (setpointe) göre, sarıdan koyu kırmızıya doğru değişen renk gradiyentlerini üzerinde gösterebilmektedir. Kullanıcının, ekrandaki hedef sıcaklık giriş alanı (Set Point) üzerinden istenen erişik sıcaklığını ayarlayabilmesi ve ana kontrol butonları (Start / Stop) aracılığıyla tüm ısıtma prosesini uzaktan kontrol etmesi mümkündür. Ayrıca, arayüzde yer alan mod seçici sayesinde geleneksel PID ile Fiziksel MPC algoritmaları arasında geçiş yapılabilirken, "Tırmanma Süresi" bilgi ekranı üzerinden sistemin ayarlanan hedefe ulaşma hızı ve termal performansı gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir.



Görsel 6. Unity 3D Arayüzü Üzerinde Test Edilen (Play Mode) HMI Arayüzü Fonksiyonları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

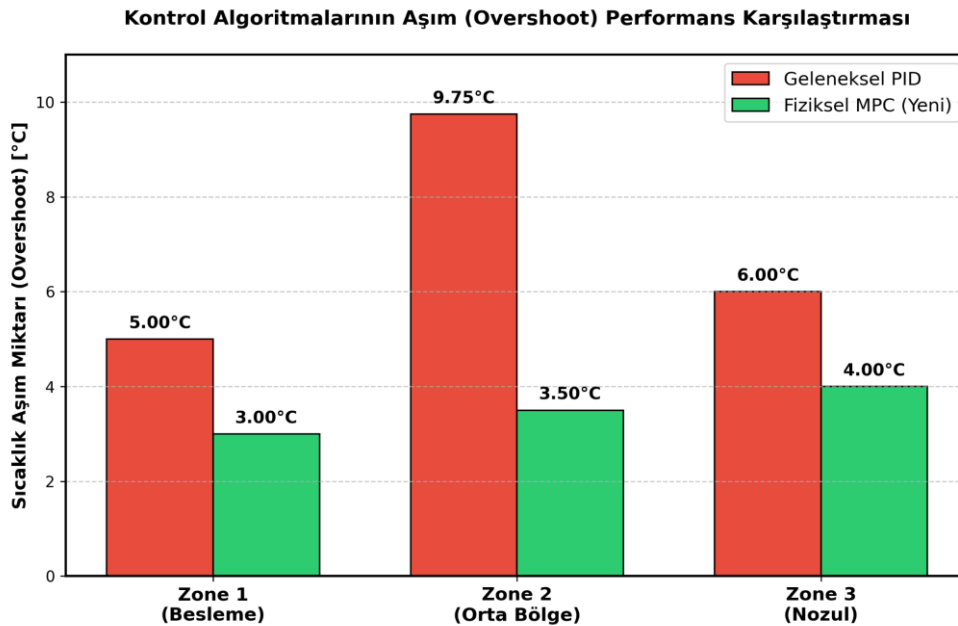
Performans testleri, enjeksiyon kovanının ısıl kütlesi en yüksek olan Orta Bölgesi (Zone 2 - 500W kütlesi) öncelikli olmak üzere tüm bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Testlerde başlangıç

sıcaklığı $\sim 38^{\circ}\text{C}$, plastik eriyik hedef sıcaklığı (Setpoint) ise 100°C olarak belirlenmiştir. Kontrol algoritması döngüsü (Δt) 1 saniye olarak sabitlenmiş ve test sonuçları milisaniye hassasiyetinde kaydedilmiştir.

Sistem, klasik geri beslemeli PID algoritmasıyla çalıştırıldığında ısıtıcıların enerjiyi doğru anda kesemediği gözlenmiştir. En zorlu bölge olan Zone 2'de kovan sıcaklığı 100°C hedefini geçerek $109,75^{\circ}\text{C}$ seviyesine kadar yükselmiş ve yaklaşık 10°C 'lik bir aşım (overshoot) oluşturmuştur. Besleme bölgesinde (Zone 1) $105,0^{\circ}\text{C}$ ve Nozul bölgesinde (Zone 3) $106,0^{\circ}\text{C}$ ölçülen bu aşımlar, yüksek ısıl atalet karşısında, sezgisel yaklaşımla (heuristic search) atanan PID parametrelerinin, kontrol sağlamada beklenen performansı sağlamakta yetersiz kalmaktadır.

Deneyisel analizle elde edilen sistem parametreleri $C = 666.7 \text{ J/K}$ ve $L = 70 \text{ s}$ ile donatılan Fiziksel MPC algoritmasıyla aynı test senaryosu tekrar edilmiştir. "Boru Hattı Enerjisi" fonksiyonunu devreye alan algoritma, hedef 100°C olmasına rağmen sıcaklık henüz 85°C civarındayken SSR görev döngüsünü (PWM) kesmeye başlamıştır. Bu proaktif öngörü stratejisi sonucunda, kütleli Orta Bölge (Zone 2) yalnızca $103,5^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarak hedefe son derece kararlı ve yumuşak bir şekilde oturmuştur. Zone 1 bölgesinde aşım $103,0^{\circ}\text{C}$, Zone 3'te ise $104,0^{\circ}\text{C}$ ile sınırlı kalmıştır.

Kullanılan kontrol algoritmalarının bölgelere göre sıcaklık aşımı performansları Görsel 7'de verilmiştir. Veriler incelendiğinde, fiziksel MPC uygulamasının PID algoritmasına göre hedef aşımını 9.75°C 'den 3.5°C 'ye indirerek, yaklaşık %64 oranında başarı sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, sistemin 100°C hedefine ulaşma süresi kısalmış ve hedef sıcaklıktaki dalgalanmalar azalmıştır. MPC algoritmasının gelecekteki sıcaklık artışını önceden tahmin edebilme yeteneğinin, polimer malzemede ısıya bağlı bozulma riskini de en aza indireceği öngörülmektedir.



Görsel 7. PID ve MPC Sıcaklık Performans Grafiği

5. SONUÇ

Bu çalışmada, 3B baskı yöntemiyle üretilen reçine/polimer kalıpların düşük maliyetli imalat süreçlerine entegrasyonu için "Tam Elektrikli Mini Plastik Enjeksiyon Makinesi" (TEMPEM) donanımı ve yazılım altyapısı geliştirilmiştir. Test verileri, endüstride yaygın olarak kullanılan standart PID algoritmalarının kovan çeliğindeki yüksek ısı ataleti ($L = 70s$) yönetmede yetersiz kaldığını ve polimer malzemenin termal bozulmasına (degradasyonuna) yol açabilecek yüksek sıcaklık aşımalarına neden olduğunu göstermiştir. Bu sorunun çözümü için sistemin enerji dinamiklerini temel alan Fiziksel (yarı-ampirik) MPC yaklaşımı uygulanmış, böylelikle ısı aşımları %65 oranında azaltılarak hedeflenen eriyik sıcaklığında çok daha kararlı ve güvenli bir kontrol imkanı yakalanmıştır.

Donanım ve yazılım entegrasyonu kapsamında, pahalı endüstriyel PLC ekranlara alternatif olarak Arduino Nano 33 IoT ve Unity 3D oyun motoru kullanılarak TCP/IP tabanlı, Android uyumlu mobil bir İnsan-Makine Arayüzü (HMI) geliştirilmiştir. TEMPEM gövdesi üzerinde herhangi bir fiziksel ekran veya gösterge paneli bulunmamakta; bunun yerine kullanıcıların uygulama mağazalarından kendi akıllı cihazlarına indirebilecekleri yazılım aracılığıyla sistem, tam entegre ve dinamik bir görsel arayüze kavuşmaktadır. Bu altyapı, akademik kurumlar ve küçük ölçekli imalatçılar için yüksek grafiksel performansla sahip, donanım maliyetlerinden arındırılmış, erişilebilir ve yenilikçi bir otomasyon çözümü sunmaktadır.

İlerleyen aşamalarda, sisteme çelik enjeksiyon vidasının ve kalıplanacak polimer granül malzemenin (PLA, ABS vb.) dahil edilmesiyle kovanın termal kapasitesi (C) artacağı varsayılmaktadır. Sistemdeki bu değişimler, geleneksel PID parametrelerinin yeniden ayarlanmasını zorunlu kılacaktır. MPC algoritması ise deneme-yanılma olmaksızın, yalnızca güncel açık çevrim test verileriyle yeni dinamiklere doğrudan adapte olabilecektir. Ayrıca, Unity 3D platformunun sunduğu geliştirme esnekliği sayesinde, mevcut mobil arayüz sadece sıcaklık kontrolü ile sınırlı kalmayacaktır. Geliştirilen bu haberleşme altyapısı, ilerleyen süreçte sistemdeki tüm servo motorların ve mekanik enjeksiyon ünitelerinin hareketlerini eşzamanlı olarak izleyip yönetecek şekilde genişletilecektir. Bu çalışma, TEMPEM'in tüm donanım ve ilişkili parametrelerinin anlık olarak simüle edilebildiği kapsamlı bir 'Dijital İkiz' (Digital Twin) modeline dönüştürülmesi için atılan ilk adımdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2025-14701 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından dolayı üniversitemize teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] A. Kampker, J. Triebs, S. Kawollek, P. Ayvaz, and T. Beyer, “Direct polymer additive tooling – effect of additive manufactured polymer tools on part material properties for injection moulding,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 10, pp. 1575–1584, Sep. 2019, doi: 10.1108/rpj-07-2018-0161.
- [2] C. Schwaar, “3D Printing Injection Molds – The Ultimate Guide,” *All3DP Pro*. Erişim Tarihi: Mar. 11, 2026. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printing-injection-molds-the-ultimate-guide/>
- [3] J. Giboz, T. Copponnex, and P. Mélé, “Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 6, pp. R96–R109, May 2007, doi: 10.1088/0960-1317/17/6/r02.
- [4] K. J. Åström and T. Hägglund, *Advanced PID Control*. International Society of Automation, 2006.
- [5] D. E. Seborg, D. A. Mellichamp, T. F. Edgar, and F. J. D. III, *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, 2016.
- [6] Y. F. Zhang, M. Li, and J. M. Dai, “PID Heating and Temperature Control Method Based On Dynamic Assignment,” in *Proceedings of the 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017)*, Paris, France: Atlantis Press, 2017. Erişim Tarihi: Ocak. 16, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2991/icmmcce-17.2017.208>
- [7] br3ttb, “GitHub - br3ttb/Arduino-PID-Library,” *GitHub*. Erişim Tarihi: Şubat 9, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library>
- [8] “Improving the Beginner’s PID – Introduction,” *Project Blog*. Erişim Tarihi: Şubat. 9, 2026. [Online]. Available: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction>
- [9] G. A. Philbrick, “Discussion: ‘Optimum Settings for Automatic Controllers’ (Ziegler, J. G., and Nichols, N. B., 1942, *Trans. ASME*, 64, pp. 759–765),” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 64, no. 8, pp. 766–766, Nov. 1942, doi: 10.1115/1.4019266.
- [10] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*. Springer Verlag, 1999.
- [11] Y. Peng, W. Wei, and J. Wang, “Model Predictive Synchronous Control of Barrel Temperature for Injection Molding Machine Based on Diagonal Recurrent Neural Networks,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 28, no. 1, pp. 24–30, Dec. 2012, doi: 10.1080/10426914.2012.718476.

- [12] M. H. Costin, P. A. Taylor, and J. D. Wright, “On the dynamics and control of a plasticating extruder,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 22, no. 17, pp. 1095–1106, Dec. 1982, doi: 10.1002/pen.760221707.
- [13] “Model Predictive Temperature Control,” tombrasier. Erişim Tarihi: Mart 10, 2026. [Online]. Available: https://marlinfw.org/docs/features/model_predictive_control.html
- [14] “Unity: Develop, Deploy, and Grow,” Unity. Erişim Tarihi: Mart 11, 2026. [Online]. Available: <http://unity3D.com>

A VEHICLE DYNAMICS–BASED CONCEPTUALIZATION OF ACTIVE SAFETY SYSTEMS AS REAL-TIME BOUNDARY MANAGEMENT MECHANISMS

Öğr. Gör., Metin KAYNAKLI

Bitlis Eren Üniversitesi,
mkaynakli@beu.edu.tr – 0000-0001-8372-1345

Dr. Öğr. Üyesi., Ahmet ALBAYRAK

Düzce Üniversitesi,
ahmetalbayrak@duzce.edu.tr - 0000-0002-2166-1102

ABSTRACT

Active safety systems are designed to prevent loss-of-control situations by intervening before vehicle instability evolves into an accident. Although contemporary research often emphasizes sensing technologies, data fusion, and algorithmic decision-making within Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), the operation of active safety systems is fundamentally constrained by vehicle dynamics and tire–road interaction limits. This study presents a dynamics-centered interpretation, framing active safety as a real-time boundary management mechanism rather than a performance-enhancing solution. The physical foundations of active safety are examined through longitudinal, lateral, and vertical vehicle dynamics. Anti-lock Braking Systems (ABS) are analyzed in terms of longitudinal slip regulation near peak tire–road friction while preserving steering controllability. Electronic Stability Control (ESC) is interpreted as a yaw stability regulator mitigating understeer and oversteer via selective braking. The influence of vertical load transfer and combined-slip constraints is further evaluated to illustrate the reduction of available control authority under critical maneuvers. The study proposes a unified boundary management framework that clarifies both the capabilities and inherent limitations of active safety systems. The findings emphasize that such systems do not extend physical stability limits but regulate proximity to them to preserve controllability. This dynamics-based perspective complements sensor- and algorithm-oriented approaches and supports transparent integration into higher-level driver assistance and automated driving architectures.

Keywords: Active safety systems, vehicle dynamics, tire–road interaction, Anti-lock Braking System (ABS), Electronic Stability Control (ESC)

1. INTRODUCTION

Road traffic accidents remain one of the leading causes of fatalities and serious injuries worldwide, despite continuous improvements in vehicle technologies and transportation infrastructure. According to global safety assessments, a substantial portion of severe accidents is associated with loss-of-control scenarios, particularly under adverse road conditions, high dynamic demand, or inappropriate driver reactions [1]. These observations underline the limitations of purely reactive safety measures and emphasize the necessity of preventive strategies capable of intervening before vehicle instability evolves into an unavoidable collision.

Historically, automotive safety development focused primarily on passive safety systems, such as seat belts, airbags, and structural crashworthiness, which aim to mitigate injury severity after an accident has occurred. While these systems have proven highly effective in reducing fatalities, they do not address the underlying dynamic mechanisms that lead to loss of vehicle controllability [2]. As traffic density increased and vehicle performance capabilities expanded, it became evident that improving safety outcomes required a fundamental shift from post-impact protection toward systems capable of actively influencing vehicle motion during critical driving situations.

This paradigm shift led to the emergence of active safety systems, which intervene directly in the vehicle's longitudinal and lateral dynamics to prevent instability. Among these systems, Anti-lock Braking Systems (ABS) and Electronic Stability Control (ESC) represent two of the most influential technological advancements in modern vehicle safety. ABS was introduced to prevent wheel lock-up during braking, thereby preserving steering capability, while ESC was developed to regulate yaw motion and maintain directional stability during cornering and combined maneuvers [2], [3]. Together, these systems form the backbone of contemporary active safety architectures.

In recent years, active safety systems have increasingly been discussed within the broader framework of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), where sensing technologies, data fusion, and algorithmic decision-making play a central role. Camera-, radar-, and lidar-based perception systems, combined with advanced control algorithms, have significantly enhanced the responsiveness and situational awareness of modern vehicles. However, this perception-driven narrative may unintentionally obscure a fundamental aspect of active safety: regardless of sensing accuracy or computational sophistication, all control interventions remain strictly constrained by the physical limits imposed by vehicle dynamics and tire–road interaction [3], [4].

From a physical perspective, vehicle dynamics defines the feasible motion envelope within which a vehicle can operate safely. Longitudinal acceleration and deceleration, lateral cornering capability, and yaw response are all governed by the forces generated at the tire–road interface. These forces are inherently limited by available friction, which depends on road surface conditions, tire characteristics, and normal load distribution [4], [5]. When demanded forces exceed these limits, loss of controllability becomes unavoidable, independent of control strategy or system intelligence. From this perspective, active safety systems can be interpreted as real-time boundary management mechanisms operating on vehicle dynamics within the physical limits imposed by tire–road interaction, rather than as purely sensor- or algorithm-

driven solutions, as illustrated in Figure 1. These systems do not extend physical limits; instead, they regulate proximity to stability boundaries to preserve controllability during safety-critical maneuvers.

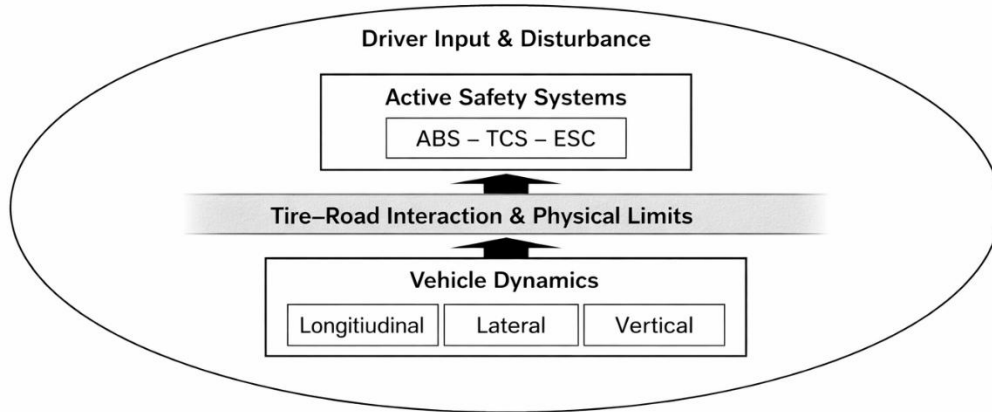


Figure 1. Vehicle dynamics-centered positioning of active safety systems as real-time boundary management mechanisms operating within physical tire-road limits.

Within this context, active safety systems should not be interpreted as mechanisms that extend physical limits, but rather as systems that regulate vehicle behavior in close proximity to these limits. ABS, for instance, does not increase the maximum available braking force; instead, it continuously modulates brake pressure to maintain wheel slip near the region of peak friction, thereby preventing wheel lock-up and preserving directional control [5], [6]. Similarly, ESC does not enhance lateral grip beyond tire capabilities but selectively applies braking forces to generate corrective yaw moments, counteracting understeer or oversteer tendencies before instability fully develops [6], [7].

This interpretation positions active safety systems as real-time boundary management mechanisms operating within a multidimensional stability envelope defined by vehicle dynamics and tire-road interaction. Longitudinal slip limits, lateral yaw stability boundaries, and load-transfer-induced variations in normal force collectively define the operational constraints within which control actions must remain feasible. Empirical studies have demonstrated that regulating vehicle motion within these boundaries significantly reduces accident risk, particularly in emergency maneuvers and low-friction conditions [8].

Despite their proven effectiveness, misunderstandings regarding the capabilities of active safety systems persist, especially as vehicles become increasingly automated. Overestimating system performance or assuming that control algorithms can overcome physical constraints may lead to unsafe reliance on automated interventions. Therefore, a clear and physically grounded interpretation of active safety operation is essential, not only for system designers but also for the integration of these functions into higher-level driver assistance and automated driving architectures.

The primary objective of this study is to present a concise yet comprehensive, vehicle dynamics–centered framework for understanding active safety systems. By systematically examining longitudinal, lateral, and vertical vehicle dynamics, the paper emphasizes the role of ABS and ESC as boundary management mechanisms rather than limit-extending solutions. This perspective aims to clarify both the capabilities and inherent limitations of active safety systems and to provide a robust physical foundation that complements perception- and algorithm-oriented approaches in modern vehicle safety research.

2. VEHICLE DYNAMICS AS THE PHYSICAL BASIS OF ACTIVE SAFETY

Vehicle dynamics provides the fundamental physical framework that governs the motion of a road vehicle under all operating conditions and defines the boundaries within which safe and controllable behavior can be maintained. From an active safety perspective, vehicle dynamics is not merely a theoretical construct used for modeling or offline analysis, but a real-time physical process that must be continuously monitored, interpreted, and regulated during vehicle operation [2], [3].

All active safety systems ultimately interact with the vehicle through forces and moments generated at the tire–road interface. Regardless of the complexity of sensing technologies or control algorithms, the effectiveness of any intervention is constrained by the vehicle’s ability to generate longitudinal and lateral forces within the limits imposed by friction, load distribution, and inertial effects [3], [4]. Consequently, a clear understanding of vehicle dynamics is essential for interpreting the true role and limitations of systems such as Anti-lock Braking Systems (ABS) and Electronic Stability Control (ESC).

The dynamic behavior of a vehicle is commonly decomposed into three coupled components: longitudinal, lateral, and vertical dynamics. While these components are often analyzed separately for clarity, they interact strongly during safety-critical maneuvers such as emergency braking, evasive steering, or braking while cornering. Active safety systems must therefore operate within a multidimensional and time-varying stability envelope shaped by the interaction of these dynamic modes [3].

2.1 Longitudinal Vehicle Dynamics and Braking Stability

Longitudinal vehicle dynamics describe the motion of a vehicle along its direction of travel and are primarily governed by traction and braking forces generated at the tire–road interface. During braking maneuvers, the ability of a tire to generate longitudinal force depends on the slip ratio between the wheel and the road surface, which exhibits a highly nonlinear relationship with the friction coefficient [4], [5].

As wheel slip increases from pure rolling conditions, the longitudinal force rises until a peak friction region is reached. Beyond this point, further increases in slip result in a rapid decline in available friction, leading to wheel lock-up and a loss of steering controllability. This nonlinear

behavior defines a critical braking stability boundary that cannot be exceeded without compromising vehicle control [4].

Anti-lock Braking Systems are specifically designed to exploit this friction–slip characteristic by dynamically modulating brake pressure at individual wheels. Rather than maximizing braking force indiscriminately, ABS continuously adjusts brake pressure to maintain wheel slip near the region of peak friction, where braking efficiency and directional stability are jointly optimized [5], [6]. By preventing wheel lock-up, ABS preserves the tire’s ability to generate lateral forces, enabling the driver to retain steering authority during emergency braking.

The nonlinear relationship between longitudinal slip ratio and friction coefficient therefore establishes a physically imposed stability boundary, which is actively regulated by the Anti-lock Braking System to prevent loss of controllability, as illustrated in Figure 2. From a vehicle dynamics perspective, ABS does not increase the maximum available friction; instead, it ensures that braking interventions remain within the usable portion of the tire–road interaction envelope.

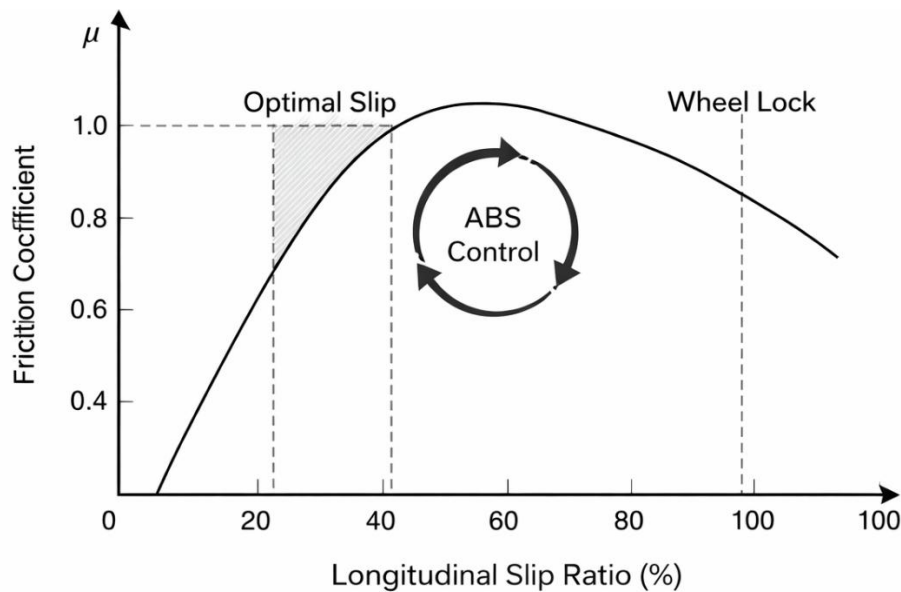


Figure 2. The Anti-lock Braking System (ABS) exploits this nonlinear μ –slip relationship by dynamically modulating brake pressure to maintain wheel slip within the optimal adhesion region.

From a vehicle dynamics perspective, ABS does not increase the maximum achievable braking force. Instead, it acts as a boundary regulation mechanism that ensures braking interventions remain within the usable portion of the tire–road interaction envelope. This interpretation highlights the role of ABS as a stability-preserving system rather than a performance-enhancing one, particularly under low-friction or spatially varying road conditions.

2.2 Lateral Vehicle Dynamics, Yaw Motion, and Stability Limits

Lateral vehicle dynamics govern a vehicle's ability to follow a desired trajectory during cornering maneuvers and are primarily determined by lateral tire forces and yaw motion. Under nominal driving conditions, the yaw response of the vehicle closely follows the driver's steering input, resulting in stable path tracking. However, when lateral force demands approach the friction limits of the tires, the vehicle may experience a loss of stability [2], [3].

Such instability typically manifests as understeer or oversteer, depending on the distribution of lateral forces between the front and rear axles. Understeer occurs when the front tires saturate first, causing the vehicle to follow a wider path than intended, whereas oversteer arises when rear tire saturation induces excessive yaw motion. Both phenomena represent violations of lateral stability boundaries imposed by tire–road interaction [3], [4].

Electronic Stability Control is designed to detect and mitigate these instability conditions by continuously comparing the driver's intended yaw behavior with the actual vehicle response. When deviations exceed predefined thresholds, ESC intervenes by selectively applying braking forces at individual wheels to generate corrective yaw moments [6], [7]. These interventions counteract excessive or insufficient yaw motion without requiring additional steering input from the driver.

This selective braking action enables ESC to counteract excessive or insufficient yaw motion without requiring additional steering input from the driver. Electronic Stability Control therefore actively regulates lateral stability by managing proximity to yaw stability boundaries, as illustrated in Figure 3. Importantly, ESC does not extend the available tire–road friction limits; rather, it redistributes braking forces to restore balance within the existing physical constraints.

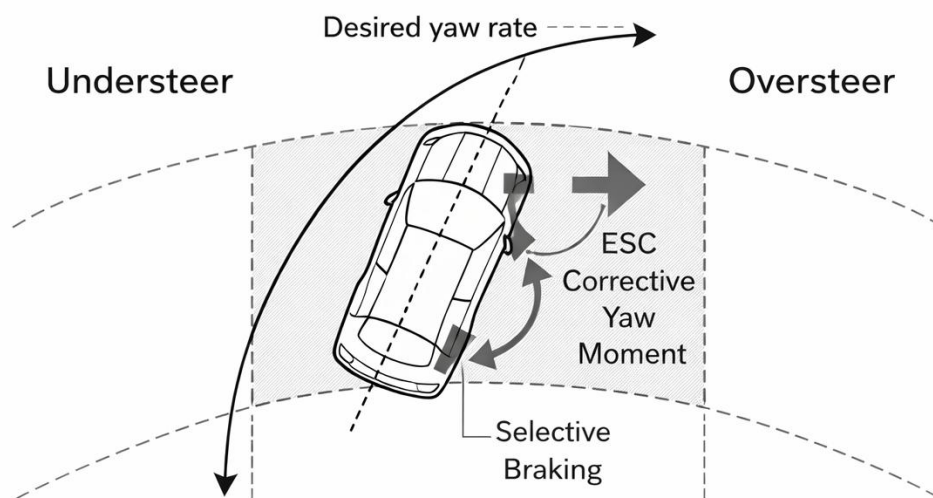


Figure 3. Lateral vehicle dynamics and yaw stability control, illustrating understeer and oversteer regions and ESC corrective yaw moment generation.

Importantly, ESC does not extend the available lateral grip of the tires. Instead, it redistributes braking forces to manage yaw motion within the existing physical constraints of the tire–road interface. From a dynamics-based perspective, ESC therefore functions as a yaw boundary management mechanism that prioritizes vehicle stability and controllability over aggressive path-following performance.

2.3 Vertical Vehicle Dynamics and Load Transfer Effects

Vertical vehicle dynamics describe the distribution of normal forces acting on individual tires and play a critical role in determining the available longitudinal and lateral force capacity. During acceleration, braking, and cornering maneuvers, inertial effects induce dynamic load transfer between axles and across the vehicle body, altering the normal forces at each tire contact patch [2], [3].

An increase in normal force generally enhances a tire’s force-generating potential; however, this relationship is nonlinear and subject to diminishing returns at higher loads. As a result, dynamic load transfer not only changes the magnitude of available forces but also affects their distribution among individual wheels, influencing overall vehicle stability [4].

Although vertical dynamics are often less emphasized in discussions of active safety, their influence is fundamental. Uneven load distribution can reduce the effectiveness of braking and yaw control interventions if not properly accounted for. Active safety systems implicitly address these effects through wheel-individual control strategies, modulating brake pressure at each wheel in accordance with instantaneous force capacity [6].

Thus, vertical vehicle dynamics act as a supporting mechanism that shapes the feasible operating region of active safety systems. By accounting for load transfer effects in real time, systems such as ABS and ESC ensure that control actions remain compatible with dynamically changing physical constraints.

2.4 Tire–Road Interaction and Combined Slip Constraints

The tire–road interface defines the ultimate physical limits within which all vehicle control and active safety systems must operate. The forces generated at the contact patch are constrained by available friction, which depends on road surface conditions, tire properties, and normal load [4], [5].

In many safety-critical scenarios, tires are required to simultaneously generate longitudinal and lateral forces, such as during braking while cornering or evasive maneuvers. Under these combined-slip conditions, the available friction must be shared between force components, resulting in reduced capacity in each direction [4].

When combined force demands exceed the frictional capability of the tire–road interface, loss of controllability becomes unavoidable regardless of control strategy or system intelligence.

Active safety systems therefore cannot overcome these physical constraints. Instead, they continuously adapt braking and stability interventions to manage proximity to the combined-slip boundary, prioritizing controllability over force maximization [3].

This perspective reinforces the interpretation of active safety systems as boundary management mechanisms rather than limit-extending solutions, particularly under low-friction or rapidly changing road conditions.

2.5 Active Safety Systems as Boundary Management Mechanisms

The analyses presented in Sections 2.1–2.4 demonstrate that active safety systems operate within a multidimensional stability envelope defined by longitudinal slip limits, lateral yaw stability boundaries, vertical load transfer effects, and combined-slip constraints. These boundaries collectively define the feasible region of vehicle motion that must not be exceeded if controllability is to be preserved [3], [4].

Within this framework, systems such as ABS and ESC do not aim to increase physical limits. Instead, they continuously regulate vehicle behavior near critical boundaries through adaptive, wheel-individual control actions. Brake pressure modulation, selective wheel braking, and torque intervention are employed to prevent excursions beyond stability limits rather than to maximize performance metrics [6], [7].

Framing active safety systems as real-time boundary management mechanisms provides a unifying physical interpretation that clarifies both their capabilities and inherent limitations. This perspective is particularly valuable as vehicles progress toward higher levels of automation, where a clear understanding of physical feasibility remains essential for safe and reliable system integration.

3. DISCUSSION

The dynamics-centered interpretation presented in this study offers a critical complement to the dominant perception- and algorithm-oriented narratives that currently characterize much of the active safety and ADAS literature. While advances in sensing technologies, data fusion, and control algorithms have undoubtedly improved system responsiveness and situational awareness, the results of this study emphasize that the ultimate effectiveness of active safety interventions remains fundamentally constrained by physical vehicle dynamics and tire–road interaction limits [3], [4].

A recurring issue in contemporary discussions of active safety and automated driving is the implicit assumption that improvements in sensing accuracy or computational intelligence can compensate for physical limitations. From a vehicle dynamics perspective, this assumption is problematic. No level of perception fidelity or control sophistication can overcome violations of friction limits or stability boundaries imposed by the tire–road interface. When demanded longitudinal or lateral forces exceed available friction, loss of controllability becomes inevitable, regardless of system intelligence or intervention speed [4], [5].

The boundary management framework proposed in this study directly addresses this misconception by explicitly framing active safety systems as regulators of proximity to physical limits rather than as mechanisms that extend those limits. Within this framework, Anti-lock Braking Systems and Electronic Stability Control are interpreted not as performance-enhancing technologies, but as stabilizing systems designed to preserve controllability under high-demand conditions. This distinction is critical, as it aligns system capabilities with physical feasibility and reduces the risk of unrealistic performance expectations.

The discussion of ABS and ESC within a unified boundary management perspective also clarifies their shared operating principles despite differing control objectives. ABS primarily regulates longitudinal slip to prevent wheel lock-up and maintain steering capability, whereas ESC manages yaw dynamics to counteract understeer and oversteer tendencies. Nevertheless, both systems rely on selective, adaptive control actions that aim to prevent excursions beyond stability boundaries rather than to maximize force generation [6], [7]. This commonality is often obscured in system-level descriptions that emphasize functional differences without sufficient consideration of underlying physical constraints.

Empirical studies evaluating the effectiveness of ESC in real-world traffic scenarios further support the importance of boundary regulation over limit extension. Large-scale statistical analyses have consistently shown significant reductions in single-vehicle crashes and loss-of-control accidents for vehicles equipped with ESC, particularly under low-friction conditions [8]. These findings are consistent with the interpretation that stabilizing vehicle motion near physical limits, rather than attempting to push beyond them, yields substantial safety benefits.

As vehicles progress toward higher levels of automation, the implications of this discussion become increasingly significant. Automated driving systems rely heavily on layered architectures in which perception, decision-making, and control modules operate in sequence. Without an explicit integration of vehicle dynamics constraints into higher-level decision-making layers, there is a risk that automated systems may request maneuvers that are physically infeasible under prevailing road conditions. Embedding a dynamics-based boundary management perspective into automated driving architectures can therefore enhance transparency, improve explainability, and reduce unsafe reliance on automation.

Another important implication of the proposed framework relates to driver–system interaction. Overconfidence in active safety or automated systems may lead drivers to adopt riskier behaviors, assuming that the vehicle can always compensate for critical situations. A clear communication of system limitations, grounded in physical feasibility rather than abstract algorithmic performance, is essential to mitigate such behavioral adaptations. The boundary management interpretation provides a conceptually simple yet physically accurate basis for conveying these limitations to both system designers and end users.

Finally, the discussion highlights the necessity of interdisciplinary alignment between vehicle dynamics, control engineering, and perception research. While perception systems determine what the vehicle knows about its environment, and control algorithms decide how to respond,

vehicle dynamics ultimately dictates what responses are physically achievable. Treating these domains in isolation risks creating mismatches between decision intent and execution capability. A dynamics-centered framework, as proposed in this study, helps ensure that higher-level safety and automation functions remain grounded in physical reality.

In summary, the discussion reinforces the central argument that active safety systems should be understood and evaluated primarily through the lens of vehicle dynamics and physical boundary management. This perspective not only clarifies system capabilities and limitations but also provides a robust foundation for the safe integration of active safety functions into increasingly automated vehicle architectures.

4. CONCLUSION

This study presented a vehicle dynamics-centered interpretation of active safety systems, framing them as real-time boundary management mechanisms operating within the immutable physical limits imposed by tire-road interaction. By shifting the focus from perception- and algorithm-dominated narratives toward fundamental vehicle dynamics, the paper clarified that the effectiveness of active safety interventions is ultimately governed by physical feasibility rather than computational sophistication.

Through the systematic examination of longitudinal, lateral, and vertical vehicle dynamics, the analysis demonstrated that Anti-lock Braking Systems and Electronic Stability Control preserve vehicle controllability by regulating proximity to stability boundaries, rather than by extending physical limits. ABS maintains braking stability by controlling wheel slip near peak friction regions, while ESC stabilizes yaw motion through selective braking interventions that counteract understeer and oversteer tendencies. Vertical load transfer and combined-slip constraints were shown to further shape the feasible operating envelope of these systems.

By unifying these mechanisms under a boundary management framework, the study provided a concise and physically grounded perspective that clarifies both the capabilities and inherent limitations of active safety systems. This interpretation reduces the risk of unrealistic performance expectations and supports a more transparent integration of active safety functions into higher-level driver assistance and automated driving architectures.

In conclusion, understanding active safety systems through the lens of vehicle dynamics and physical boundary management offers a robust foundation for the design, evaluation, and integration of future safety and automation technologies. As vehicle automation advances, maintaining a clear alignment between decision-making strategies and physical feasibility will remain essential for ensuring safe and reliable vehicle operation.

REFERENCES

- [1] World Health Organization, *Global Status Report on Road Safety*, WHO, Geneva.

- [2] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE International, 1992.
- [3] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed., Springer, 2012.
- [4] H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed., Elsevier, 2012.
- [5] E. Bakker, L. Nyborg, H. B. Pacejka, “The Magic Formula Tyre Model,” *Vehicle System Dynamics*, 1992.
- [6] U. Kiencke, L. Nielsen, *Automotive Control Systems*, Springer, 2005.
- [7] E. Liebmenn et al., “Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP),” *Proc. ESV Conference*, 2005.
- [8] C. M. Farmer, “Effects of Electronic Stability Control,” *Traffic Injury Prevention*, 2006.

**EVOLUTION FROM ACTIVE SAFETY SYSTEMS TO ADAS: A VEHICLE
DYNAMICS AND SENSOR FUSION–BASED SYSTEM-LEVEL REVIEW**

Öğr. Gör., Metin KAYNAKLI

Bitlis Eren Üniversitesi,

mkaynakli@beu.edu.tr – 0000-0001-8372-1345

Dr. Öğr. Üyesi, Ahmet ALBAYRAK

Düzce Üniversitesi,

ahmetalbayrak@duzce.edu.tr - 0000-0002-2166-1102

ABSTRACT

Road traffic safety has evolved from a predominantly reactive paradigm centered on passive protection toward a proactive and preventive approach driven by active safety systems and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). This transformation has been enabled by advances in vehicle dynamics control, sensing technologies, electronic control units, and data-driven decision-making architectures. This paper presents a structured and system-level overview of active safety systems in automotive engineering, emphasizing their evolution toward ADAS and automated driving technologies. Fundamental vehicle dynamics concepts are discussed as the physical basis of safety-critical interventions, followed by a systematic review of core active safety systems such as the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC). Building upon this foundation, key ADAS functionalities—including Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB), lane support systems, blind spot detection, and traffic sign recognition—are examined from a perception- and control-oriented perspective. Particular emphasis is placed on the role of sensors and sensor fusion architectures in enhancing perception reliability and decision accuracy. Rather than focusing on isolated subsystems, this study adopts an integrated engineering perspective that highlights the interaction between vehicle dynamics, sensing, control algorithms, and human factors. The paper aims to provide a coherent reference framework for researchers, engineers, and students, while supporting the transition toward safer and more intelligent mobility systems.

Keywords: Active Safety Systems, ADAS, Vehicle Dynamics, Sensor Fusion, Automotive Safety, Autonomous Driving

1. INTRODUCTION

Road transportation plays a central role in modern societies by enabling economic development, social interaction, and individual mobility. However, the continuous increase in vehicle ownership, traffic density, and average operating speeds has led to a persistent rise in both the frequency and severity of road traffic accidents worldwide [1], [2]. Despite continuous improvements in vehicle technologies, traffic management strategies, and road infrastructure, traffic accidents remain one of the leading causes of fatalities and serious injuries, representing a major global public health and safety concern [3].

Recent studies emphasize that traffic safety cannot be addressed solely through driver behavior, education, or enforcement measures. Instead, it requires integrated engineering solutions that combine vehicle dynamics control, active safety systems, sensing technologies, and intelligent driver assistance functions within a unified framework [3], [4]. The increasing complexity of modern traffic environments, characterized by heterogeneous traffic participants, higher vehicle automation levels, and dense urban mobility, has further exposed the limitations of traditional reactive safety approaches [5].

Historically, automotive safety engineering initially focused on passive safety systems designed to mitigate injury severity after a collision had already occurred. Technologies such as seat belts, airbags, and crashworthy vehicle structures have significantly improved occupant protection and have contributed to substantial reductions in fatality rates over the past decades [3], [6]. Nevertheless, passive safety inherently addresses the consequences of accidents rather than their root causes, offering limited effectiveness in preventing accident occurrence, particularly in complex and dynamic driving scenarios.

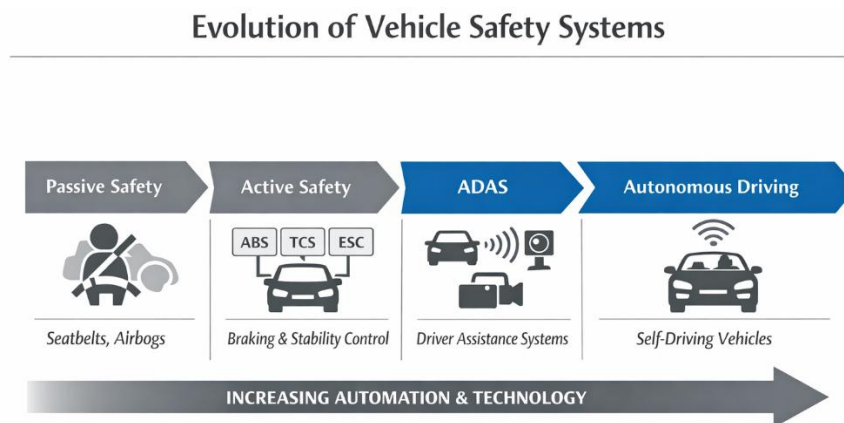


Figure 1. Evolution of automotive safety systems from passive safety to active safety, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), and autonomous driving, illustrating the increasing level of automation and system intelligence.

As illustrated in Figure 1, the evolution of automotive safety systems has followed a progressive transition from reactive protection mechanisms toward proactive and intelligent safety architectures. The introduction of active safety systems marked a fundamental paradigm shift by enabling vehicles to intervene before a critical loss of control or collision occurs. Early active safety technologies, including the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC), expanded safety beyond structural protection by

actively supervising vehicle dynamics and maintaining controllability near physical limits [6], [7]. These systems transformed safety from a purely mechanical concept into a real-time control problem governed by vehicle dynamics, sensing, and feedback control.

Building upon this foundation, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) further extended the scope of active safety by incorporating environmental perception and driver support functionalities. By utilizing onboard sensors such as radar and cameras, together with real-time data processing, ADAS enables early hazard detection, shared control, and context-aware interventions, significantly reducing accident risk and severity [7], [8]. Functions such as Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB), lane support systems, and blind spot detection illustrate this transition toward perception-based safety strategies that actively support the driver during critical driving situations [9].

This evolutionary trajectory ultimately leads toward automated and autonomous driving, where perception, decision-making, and control functions are increasingly automated in accordance with standardized automation taxonomies such as SAE J3016 [10]. In this context, active safety systems and ADAS can be regarded as intermediate and enabling layers that bridge conventional vehicle control with higher levels of automation and autonomy.

For many decades, automotive safety engineering relied predominantly on vehicle-centric control strategies that focused on maintaining stability and controllability without explicitly considering the surrounding environment. However, real-world accident analyses and near-miss studies have demonstrated that many critical situations arise from interactions between the vehicle, other traffic participants, and infrastructure elements rather than from vehicle instability alone [5]. This realization has driven a shift toward integrated safety concepts that combine vehicle dynamics control with environmental perception and human-machine interaction.

Accordingly, this paper aims to provide a structured and system-level overview of active safety systems and their evolution toward Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) within the context of automotive engineering. Rather than treating safety functions as isolated subsystems, the study emphasizes the interaction between vehicle dynamics, sensing technologies, control algorithms, and human factors. By adopting this holistic perspective, the paper seeks to clarify the role of active safety as a critical bridging layer between conventional vehicle control and higher levels of automated and autonomous driving, while offering a coherent reference framework for researchers, engineers, and students.

2. VEHICLE DYNAMICS AS THE BASIS OF ACTIVE SAFETY

Vehicle dynamics constitutes the fundamental physical foundation upon which all active safety systems are designed and implemented. It describes the motion behavior of a vehicle under the influence of longitudinal, lateral, and vertical forces and defines the operational limits within which safe and stable driving can be maintained [1], [2]. From an active safety perspective,

vehicle dynamics is not merely a theoretical framework, but a continuously monitored and actively controlled process that directly governs system decision-making and intervention strategies.

Longitudinal vehicle dynamics governs acceleration and deceleration behavior and plays a central role in braking- and traction-related safety functions. During braking maneuvers, the interaction between tire slip ratio and road friction determines the maximum achievable braking force while preserving steering controllability. Due to the nonlinear relationship between tire slip and friction coefficient, excessive slip leads to wheel lock-up and a significant reduction in lateral force generation [2]. Active safety systems such as the Anti-lock Braking System (ABS) exploit this relationship by modulating brake pressure in real time to maintain wheel slip within an optimal range, thereby maximizing braking efficiency while preserving directional control [6].

In acceleration scenarios, longitudinal dynamics is equally critical for maintaining traction and stability. Excessive drive torque can induce wheel spin, particularly on low-friction surfaces, resulting in degraded traction and reduced vehicle controllability. Traction-oriented safety functions detect excessive longitudinal slip by monitoring wheel speed differences and intervene through engine torque reduction and/or selective wheel braking [3], [6]. These interventions enhance straight-line stability and contribute indirectly to improved lateral control during combined acceleration and cornering maneuvers.

Lateral vehicle dynamics primarily governs cornering behavior and directional stability. As vehicle speed increases or curve radius decreases, the lateral forces required from the tires rise rapidly, bringing the vehicle closer to its physical adhesion limits. When these limits are exceeded, understeer or oversteer conditions may occur, potentially leading to loss of control [1], [2]. Electronic Stability Control (ESC) systems address these phenomena by continuously comparing the driver's intended trajectory—derived from steering input and vehicle speed—with the actual vehicle motion measured by yaw rate and lateral acceleration sensors [6], [7].

When a deviation between intended and actual vehicle motion is detected, ESC generates corrective yaw moments through selective wheel braking and, when necessary, coordinated engine torque intervention. From a control-theoretic perspective, ESC represents a closed-loop yaw stabilization system operating near the physical limits of tire–road adhesion. The objective of such interventions is not to override the driver but to assist in restoring stability while preserving driver authority and vehicle controllability [6].

Vertical vehicle dynamics and dynamic load transfer further influence the effectiveness of active safety interventions. Braking, acceleration, and cornering maneuvers induce transient load shifts between axles and individual wheels, altering the normal forces acting on the tires and, consequently, the available friction forces [2]. Active safety systems must account for these effects to ensure that control actions remain physically feasible, particularly under combined-slip conditions where longitudinal and lateral tire forces are simultaneously demanded.

From a system-level perspective, active safety can be interpreted as the real-time management of vehicle dynamics close to stability boundaries. Control algorithms rely on simplified yet

physically interpretable vehicle models, combined with sensor feedback, to estimate the instantaneous vehicle state. When deviations from stable behavior are detected, timely and coordinated interventions are applied to restore controllability. This continuous interaction between physical vehicle behavior and electronic control systems represents the core principle of modern active safety engineering and forms the foundation for higher-level driver assistance functions [1], [3].

3. FUNDAMENTAL ACTIVE SAFETY SYSTEMS

Fundamental active safety systems constitute the first and most critical layer of preventive vehicle safety in modern automotive engineering. These systems are designed to maintain vehicle controllability by ensuring that tire–road interaction remains within physically feasible limits during critical driving maneuvers. Among them, the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC) form the core architecture of active vehicle safety and represent the foundation upon which more advanced driver assistance functions are built [3], [6].

The Anti-lock Braking System (ABS) was the earliest widely adopted active safety technology and marked a milestone in the transition from purely mechanical braking systems to electronically controlled safety functions. ABS prevents wheel lock-up during emergency braking by modulating brake pressure at each wheel individually. By maintaining wheel slip within an optimal range, ABS preserves steering controllability and enables the driver to perform evasive maneuvers while braking, particularly on low-friction surfaces [2], [6]. From a vehicle dynamics perspective, ABS exploits the nonlinear relationship between tire slip ratio and the friction coefficient, ensuring that maximum longitudinal braking force is achieved without compromising lateral force generation.

While ABS primarily addresses braking scenarios, the Traction Control System (TCS) extends active safety principles to acceleration and traction management. Excessive wheel spin at the driven wheels, especially during acceleration on low-adhesion surfaces, can significantly degrade vehicle stability and directional control. TCS detects excessive longitudinal slip by comparing the rotational speeds of driven and non-driven wheels and intervenes through engine torque reduction and/or selective wheel braking [3], [6]. By limiting wheel spin, TCS improves traction utilization and contributes to enhanced vehicle stability during combined acceleration and cornering maneuvers.

Electronic Stability Control (ESC) represents the most comprehensive and influential system among fundamental active safety technologies. Unlike ABS and TCS, which primarily address longitudinal dynamics, ESC actively supervises the vehicle's lateral motion and yaw behavior. The system continuously compares the driver's intended trajectory—derived from steering input and vehicle speed—with the actual vehicle motion measured by yaw rate and lateral acceleration sensors [4], [6]. When deviations indicative of understeer or oversteer are detected, ESC generates corrective yaw moments through selective wheel braking and, if necessary, coordinated engine torque intervention.

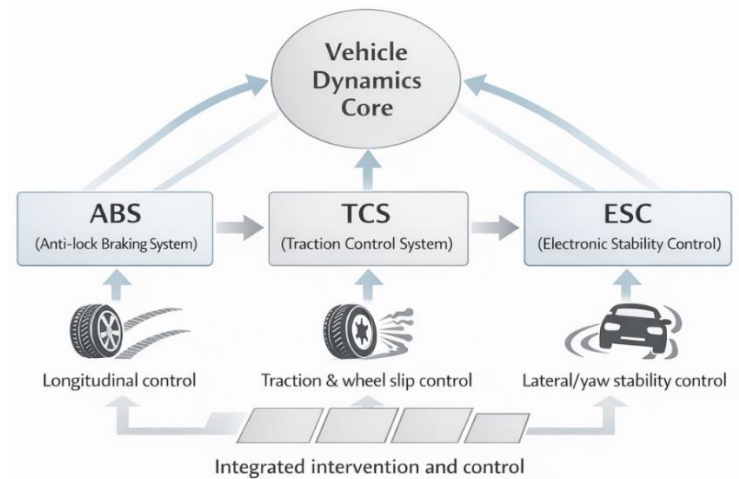


Figure 2. Integrated structure of fundamental active safety systems, illustrating the interconnection of the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC) within a unified vehicle dynamics control framework.

From a control engineering perspective, ESC can be interpreted as a closed-loop yaw stabilization system operating near the physical limits of tire–road adhesion. The primary objective of ESC is not to replace driver control but to support the driver in maintaining vehicle stability by applying corrective interventions that are timely, precise, and minimally intrusive. Extensive experimental studies and real-world accident statistics have demonstrated that ESC significantly reduces single-vehicle accidents and loss-of-control crashes, making it one of the most effective safety technologies introduced in recent decades [4], [6].

Although ABS, TCS, and ESC are often described as distinct safety functions, modern vehicles implement these systems within an integrated control architecture rather than as independent modules. As illustrated in Figure 2, fundamental active safety systems are interconnected through a unified vehicle dynamics control framework in which longitudinal braking, traction management, and lateral stability control are coordinated in real time. This integration ensures that control interventions are coherent and non-conflicting, particularly in complex driving scenarios involving simultaneous braking, acceleration, and steering inputs.

In contemporary vehicle electronic architectures, ABS, TCS, and ESC share common sensors, actuators, and electronic control units, enabling efficient information exchange and coordinated decision-making. This integrated structure not only enhances overall safety performance but also provides a scalable foundation for higher-level Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Consequently, fundamental active safety systems should be regarded not as isolated technologies, but as a cohesive control layer that bridges basic vehicle dynamics control and perception-based safety functions [3], [7].

4. ADAS FUNCTIONS AND PERCEPTION TECHNOLOGIES

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) represent an important evolution of active safety by extending risk assessment beyond internal vehicle dynamics to include perception of the surrounding traffic environment. While fundamental active safety systems such as ABS, TCS, and ESC primarily intervene when vehicle stability limits are approached, ADAS functions aim to anticipate hazardous situations at an earlier stage and support the driver through warnings, guidance, and limited automated interventions [7], [8].

One of the most widely deployed ADAS functions is Adaptive Cruise Control (ACC), which enhances conventional cruise control by actively regulating vehicle speed relative to a preceding vehicle. Using radar- and camera-based perception, ACC continuously monitors inter-vehicle distance and relative speed and adjusts acceleration and deceleration to maintain a safe following gap [8], [9]. By reducing unnecessary speed fluctuations and supporting the driver in longitudinal control tasks, ACC contributes to improved driving comfort and a measurable reduction in rear-end collision risk. Autonomous Emergency Braking (AEB) systems are among the most safety-critical ADAS functions and have demonstrated substantial effectiveness in real-world accident prevention. AEB systems continuously assess collision risk by analyzing parameters such as relative speed, distance to obstacles, and time-to-collision. When an imminent collision is detected, the system typically follows a staged intervention strategy, beginning with driver warnings and progressing to partial or full automatic braking if the driver response is insufficient [9], [14].

Lane-based assistance systems address safety risks associated with unintended lateral deviations, which are often caused by driver distraction, fatigue, or reduced situational awareness. Lane Departure Warning (LDW) systems provide visual, auditory, or haptic alerts when the vehicle unintentionally departs from its lane, whereas Lane Keeping Assist (LKA) systems apply limited corrective steering torque to guide the vehicle back toward the lane center [10]. These systems rely primarily on camera-based perception to detect lane markings and estimate the vehicle's lateral position relative to the roadway.

Blind Spot Detection (BSD) and Lane Change Assistance (LCA) systems further enhance lateral situational awareness by monitoring adjacent lanes using short- and medium-range radar sensors. By providing timely warnings when other vehicles are present in areas not directly visible to the driver, these systems help reduce the risk of side collisions during lane change maneuvers [10]. Traffic Sign Recognition (TSR) systems complement these functions by detecting and interpreting relevant traffic signs and presenting this information to the driver in real time. The effectiveness of ADAS functions is fundamentally dependent on the reliability and robustness of environmental perception. Sensors such as radar and cameras provide complementary information about the driving environment, but each sensing modality exhibits inherent limitations related to range, resolution, field of view, and sensitivity to environmental conditions [10], [13].

To address these limitations, modern ADAS architectures increasingly rely on multi-sensor perception and fusion strategies. By combining information from heterogeneous sensors, perception systems can mitigate individual sensor weaknesses and generate a more consistent and reliable representation of the driving environment [11], [12].

Overall, ADAS functions embody a proactive safety philosophy that emphasizes early hazard detection, shared control, and effective human–machine cooperation. Rather than replacing the driver, ADAS systems are designed to augment human perception and decision-making capabilities and to act as a transitional safety layer that bridges conventional vehicle control systems with more advanced automated driving functionalities [7].

5. SENSOR FUSION AND FUTURE TRENDS

As active safety systems continue to evolve toward more advanced ADAS functionalities and higher levels of driving automation, the reliability and robustness of environmental perception have become decisive factors for overall system performance. Single-sensor perception approaches are inherently limited by noise, restricted fields of view, environmental sensitivity, and partial observability of complex traffic scenarios. Consequently, sensor fusion has emerged as a fundamental enabling technology for modern active safety and ADAS architectures [15].

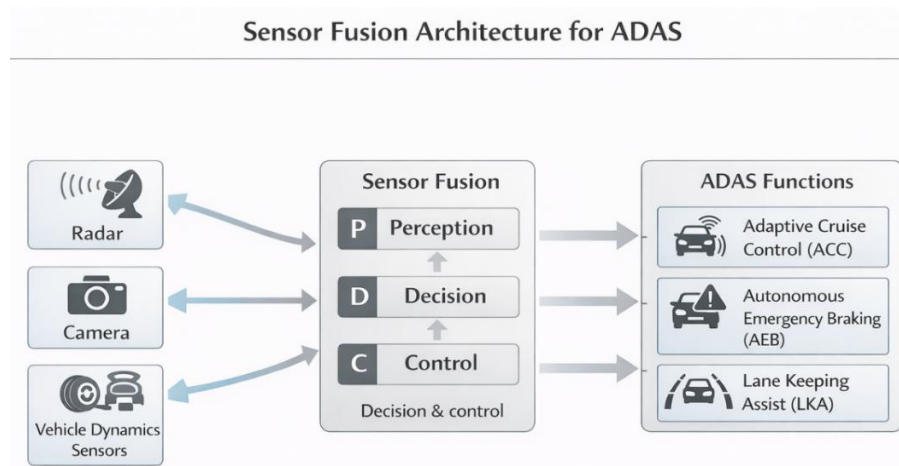


Figure 3. Sensor fusion architecture for ADAS, illustrating the integration of radar, camera, and vehicle dynamics sensors into a unified perception, decision-making, and control framework supporting multiple ADAS functions.

Sensor fusion refers to the systematic integration of information obtained from multiple sensing modalities—such as radar, cameras, lidar, and vehicle dynamics sensors—in order to generate a more accurate, consistent, and robust representation of the driving environment. By combining complementary sensor characteristics, fusion-based perception systems reduce uncertainty and improve situational awareness under diverse traffic and environmental conditions [15], [16]. As illustrated in Figure 3, multi-sensor fusion architectures form a unified perception layer that supports downstream decision-making and control functions.

From an architectural perspective, sensor fusion strategies can be categorized according to the level at which information is combined, commonly referred to as data-level, feature-level, and decision-level fusion [16]. Data-level fusion operates directly on raw sensor measurements and can achieve high estimation accuracy, but it requires precise sensor synchronization and substantial computational resources. Feature-level fusion integrates higher-level features

extracted from individual sensors, offering a balance between performance and computational efficiency. Decision-level fusion combines the outputs of independent perception or classification modules, providing modularity and robustness at the expense of reduced granularity.

In active safety applications, sensor fusion is not limited to external environment perception alone. Vehicle dynamics information—including wheel speeds, longitudinal and lateral acceleration, yaw rate, and steering angle—is jointly evaluated with object detection and tracking results to enable context-aware risk assessment. The same external hazard may pose different levels of risk depending on vehicle speed, available tire–road friction, and driver intent. Fusion-based perception thus enables safety functions to adapt their intervention strategies according to both external conditions and internal vehicle states [3], [15].

Recent advances in machine learning and artificial intelligence have further enhanced the capabilities of sensor fusion frameworks. Deep learning–based perception models have demonstrated significant performance improvements in object detection, classification, and scene understanding tasks, particularly in complex urban environments [16], [17]. However, purely data-driven approaches introduce challenges related to transparency, explainability, validation, and functional safety—issues that are especially critical in safety-related automotive applications.

As a result, current research trends increasingly emphasize hybrid system architectures that combine physics-based vehicle models with data-driven perception and decision-making modules. Such hybrid approaches leverage the interpretability and physical consistency of model-based methods while benefiting from the adaptability and performance of learning-based techniques. This combination is widely regarded as a promising pathway toward robust, explainable, and certifiable active safety and ADAS systems [16], [18].

Another important future trend is the growing emphasis on human–machine interaction and driver monitoring. As ADAS functions assume higher levels of control authority, maintaining appropriate driver awareness and engagement becomes a safety-critical requirement. Sensor fusion architectures are therefore expanding to incorporate driver monitoring sensors and contextual information, enabling a more holistic and human-centered safety framework [18].

Overall, sensor fusion represents a key technological bridge between conventional active safety systems and more advanced automated driving functionalities. By enhancing perception reliability, enabling context-aware decision-making, and supporting adaptive control strategies, fusion-based architectures form the backbone of next-generation automotive safety systems and will play a decisive role in the ongoing transition toward safer, more intelligent, and human-centered mobility [15], [18].

6. CONCLUSIONS

This paper has presented a comprehensive and system-level overview of active safety systems in automotive engineering, with a particular emphasis on their evolution toward Advanced

Driver Assistance Systems (ADAS). Rather than addressing individual safety functions as isolated subsystems, the study adopted an integrated perspective that highlights the dynamic interaction between vehicle dynamics, sensing technologies, control algorithms, and human factors.

Fundamental active safety systems such as the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC) were examined as the physical and functional foundation of preventive vehicle safety. These systems demonstrate how real-time vehicle dynamics control can effectively mitigate loss-of-control scenarios by maintaining tire–road interaction within physically feasible limits. The analysis emphasized that the effectiveness of such systems is inherently constrained by vehicle dynamics, tire characteristics, and road friction conditions, underscoring the importance of physically consistent and robust control strategies.

Building upon this foundation, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) were discussed as an extension of active safety toward perception-based and proactive risk mitigation. Functions such as Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB), lane-based assistance systems, and blind spot monitoring illustrate how environmental perception and shared control strategies can significantly reduce accident risk and severity. These systems shift automotive safety from a predominantly reactive paradigm toward a more anticipatory and preventive approach while preserving the driver’s supervisory role.

Sensor fusion was identified as a critical enabling technology for modern active safety and ADAS architectures. By integrating heterogeneous sensor data with vehicle dynamics information, fusion-based perception frameworks enhance robustness, reliability, and situational awareness across a wide range of driving scenarios. The discussion highlighted that sensor fusion is not merely a performance enhancement but a necessary architectural element for achieving consistent safety behavior in complex and uncertain traffic environments.

The paper further emphasized emerging research trends toward hybrid system architectures that combine physics-based vehicle models with data-driven perception and decision-making techniques. While machine learning–based approaches offer substantial performance improvements, challenges related to transparency, explainability, validation, and functional safety remain critical considerations in safety-related automotive applications. Addressing these challenges is essential for ensuring industrial acceptance, regulatory compliance, and public trust in next-generation automotive safety systems.

In conclusion, active safety systems should be regarded as a crucial bridging layer between conventional vehicle control and higher levels of automated driving. Their continued development, integration, and validation will play a decisive role in improving traffic safety, reducing accident severity, and supporting the transition toward safer, more intelligent, and human-centered mobility systems. The system-level framework presented in this study aims to serve as a coherent reference for researchers, engineers, and students engaged in the design, evaluation, and deployment of future automotive safety technologies.

REFERENCES

- [1] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed., Springer, 2012.
- [2] H. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed., Elsevier, 2012.
- [3] Bosch, *Bosch Automotive Handbook*, 10th ed., Wiley, 2018.
- [4] M. Klomp, “Vehicle Stability Control Systems,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 32, no. 5, pp. 38–55, 2012.
- [5] J. Ackermann and T. Bunte, “Robust prevention of limit cycles for robustly decoupled car steering dynamics,” *Kybernetika*, vol. 35, no. 1, pp. 105–116, 1999.
- [6] P. van Zanten, “Bosch ESP Systems: 5 Years of Experience,” *SAE Technical Paper* 2000-01-1633, 2000.
- [7] S. E. Shladover, “Connected and Automated Vehicle Systems,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 10, no. 1, pp. 7–19, 2018.
- [8] J. C. Hayward, “Near Miss Determination through Use of a Scale of Danger,” *Highway Research Record*, no. 384, 1972.
- [9] Euro NCAP, *AEB Test Protocol and Rating Guidelines*, European New Car Assessment Programme, 2023.
- [10] SAE International, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems*, SAE J3016, 2021.
- [11] D. J. Yeong et al., “Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, 2021.
- [12] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, *Probabilistic Robotics*, MIT Press, 2005.
- [13] Y. Bar-Shalom, X. R. Li, T. Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*, Wiley, 2001.
- [14] K. Huang et al., “Multi-Modal Sensor Fusion for Autonomous Driving Perception,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023.
- [15] A. Eskandarian (Ed.), *Handbook of Intelligent Vehicles*, Springer, 2012.
- [16] N. Lu et al., “A Review of Driver Monitoring Systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, 2022.
- [17] European Commission, *ADAS and Active Safety Systems*, ERSO Report, 2024.

**FREN BALATALARINDA ARAMİD ve CAM ELYAFLI TEKSTİL
KATMANLARININ SÜRTÜNME STABİLİTESİ ve AŞINMA PERFORMANSINA
ETKİSİ**

Doç.Dr., Ali Can YILMAZ

Çukurova Üniversitesi

acyilmaz@cu.edu.tr - 0000-0001-9832-9880

Doç.Dr., Özlem ERDEM YILMAZ

Çukurova Üniversitesi

ozlemerdem@cu.edu.tr - 0000-0002-0976-2162

ÖZET

Aramid ve cam elyaf içerikli ince tekstil katmanların otomotiv fren balatalarının tribolojik performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, standart balata, aramid elyaf ara tabakalı balata ve cam elyaf ara tabakalı balata olmak üzere üç farklı numune hazırlanmış ve pin-on-disk tribometresi ile kuru sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi, numunelerin aşınma miktarları ve yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, aramid elyafli ara tabakanın sürtünme katsayısını daha kararlı hale getirdiğini ve sürtünme katsayısındaki düşüşü en aza indirdiğini göstermiştir. Aramid takviyeli numunede sürtünme katsayısı 0.40 seviyesinden test sonuna dek 0.36'ya çok küçük bir azalma gösterirken, standart numunede 0.45'ten 0.37'ye düşüş gözlenmiştir. Cam elyaf takviyeli numune ise başlangıçta yüksek sürtünme katsayısına (0.43) ulaşmasına karşın test sonunda 0.34'e inerek en belirgin fade (azalma) davranışını sergilemiştir. Aşınma ölçümleri, aramid elyafli katman kullanılan balatanın en düşük kütle kaybına (standartla kıyasla yaklaşık %50 daha az) sahip olduğunu, cam elyafli katmanlı balatanın ise aşınmayı orta düzeyde azalttığını göstermiştir. Sonuç olarak, fren balatası yüzeyinde ince bir aramid elyaf tekstil ara tabakası kullanımı, sürtünme kararlılığını artırıp aşınmayı belirgin ölçüde azaltarak balata performansını iyileştirmektedir. Elde edilen bulgular, fren balatalarında tekstil esaslı takviye katmanlarının kullanımının potansiyel faydalarına işaret etmekte olup ileride balata tasarımlarında sürtünme stabilitesini geliştirmek için bu yaklaşımın değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Fren balatası, aramid elyaf, tribolojik performans

1. GİRİŞ

Otomotiv fren sistemleri, bir aracın güvenli şekilde yavaşlatılması ve durdurulması için kritik önem taşır. Fren balataları ve diskleri arasındaki sürtünme malzemeleri, hareket enerjisini ısı enerjisine dönüştürerek frenlemeyi sağlar. Etkili bir fren balatası malzemesi, farklı çalışma koşullarında (değişen yük, hız, sıcaklık ve ıslak/kuru durumlar dahil) mümkün olduğunca sabit bir sürtünme katsayısı üretebilmelidir. Ayrıca düşük aşınma, yüksek ısıl kararlılık, düşük gürültü ve titreşim gibi bir dizi istenen özelliğe de sahip olmalıdır [1]. Ancak tüm bu özelliklerin tek bir malzemede toplanması imkânsıza yakındır. Bu nedenle modern fren balataları, bu çelişkili gereksinimleri dengelemek amacıyla genellikle 10–15 farklı bileşenden oluşan kompozit yapıdadır. Bağlayıcı reçine, takviye edici lifler, sürtünme düzenleyici katkıları (katı yağlayıcılar, aşındırıcılar vb.) ve dolgu malzemeleri gibi bileşenlerin dikkatli formülasyonu ile istenen tribolojik özellikler elde edilmeye çalışılır [2].

Geçmişte fren balatalarında asbest lifi yaygın bir takviye malzemesi olarak kullanılmış ancak sağlık riskleri nedeniyle 1980'lerden itibaren yasaklanmıştır. Günümüzde asbestsiz organik balatalarda (NAO tip) asbest yerine çelik yünü gibi metallerin yanı sıra karbon, cam ve aramid (Kevlar) gibi lifler yapısal takviye ve sürtünme düzenleyici olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu lifler, balatanın mekanik dayanımını arttırmanın yanı sıra, yüksek sıcaklıklarda performansı iyileştirmek, sürtünmeyi stabilize etmek, aşınma ve gürültüyü azaltmak gibi işlevler de görebilir [1]. Örneğin aramid elyaf, fren balatası kompozitlerinde özellikle öne çıkan bir takviyedir; literatürde aramid lifinin balatalarda sürtünme kararlılığını artırdığı ve aşınma direncini iyileştirdiği bildirilmektedir. Aramid lifler, yumuşak ve ısıya dayanıklı yapıları sayesinde yüksek sıcaklıklarda dahi sürtünme yüzeyinde kararlı bir film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısındaki dalgalanmaları azaltabilmektedir [2]. Diğer taraftan cam elyafları da balata yapılarında sık kullanılan takviyelerdendir; cam elyaf, sert ve kırılğan yapısıyla sürtünme esnasında mikro-pençeler gibi davranarak sürtünme katsayısını yükseltebilmekte ve balata aşınmasını azaltabilmektedir. Nitekim bir çalışmada, cam elyaf takviyeli fren malzemelerinin daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma oranı sergilediği, bunun da cam liflerin yüzeyde biriken kararlı bir üçüncü gövde (sürtünme filmi) oluşturmasıyla ilişkili olduğu belirtilmektedir [3].

Balata performansını geliştirmek için yeni malzeme yaklaşımlarından biri de tekstil esaslı ara katmanlar kullanmaktır. Örneğin, dokunmuş (örgü) haldeki fiber kumaşlar uygun reçinelerle empregne edilerek fren balatası astarı olarak kullanılabilir. Nitekim endüstride cam elyaf iplikleri ve pirinç tellerden dokunmuş reçine emdirilmiş balata astarları mevcuttur ve yüksek dayanım ile uzun ömür sunmaktadır [4]. Bu tür dokuma fren astarları, özellikle tambur frenlerde ve ağır hizmet uygulamalarında kullanılmakta ve sürtünme kararlılığına katkı sağlamaktadır. Bu bilgiler ışığında, çalışmamızda disk fren balatası yüzeyine entegre edilen ince bir aramid elyaf kumaş katman ile cam elyaf kumaş katmanının, balatanın sürtünme davranışına ve aşınma direncine etkileri araştırılmıştır. Bu yenilikçi yaklaşım ile liflerin balata yüzeyinde sürekli bir ağ oluşturmasının sürtünme kararlılığı üzerinde nasıl bir etkisi olacağı ortaya konulmaya çalışılmıştır. Çalışma

kapsamında hazırlanan numuneler pin-on-disk tribometre testleri ile değerlendirilmiş; sürtünme katsayısının zamanla değişimi, aşınan malzeme miktarı ve yüzey sıcaklığı ölçülerek aramid ve cam elyafli ara tabakaların fren balatası performansına katkıları tartışılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Numune hazırlanması: Çalışmada fren balataları için üç tip numune üretilmiştir: (i) standart balata numunesi: ticari bir NAO (asbestsiz organik) balata formülasyonu referans alınarak, fenolik reçine bağlayıcı ve çeşitli fiber, dolgu ve sürtünme katkıları içeren bir kompozit malzeme hot-press yöntemiyle kalıplanmıştır. (ii) aramid elyaf ara tabakalı balata: aynı balata kompozisyonu, sürtünme yüzeyine yakın konumda ince bir aramid kumaş tabaka entegre edilerek imal edilmiştir. Aramid kumaş olarak düz dokuma Kevlar® tekstil (0.2 mm kalınlığında) kullanılmıştır. Bu kumaş tabaka, balata karışımı kalıba alınmadan önce kalıp yüzeyine yerleştirilmiş ve reçine ile empregne olacak şekilde balata malzemesi ile birlikte sıcak preslenerek bütünleşik bir yapı oluşturulmuştur. (iii) Cam elyaf ara tabakalı balata: benzer şekilde, sürtünme yüzeyine cam elyaf dokuma kumaş (ince cam fiber bez) yerleştirilerek imal edilmiştir. Tüm numuneler 40×40×6 mm boyutlarında plakalar olarak preslenmiş, ardından $\phi=10$ mm boyutunda test örnekleri bu plakalardan kesilmiştir. Hazırlanan numunelerin sürtünme yüzeyleri 320 grit zımpara ile hafifçe taşlanarak eşitlenmiş ve test öncesi yüzeyler etil alkol ile temizlenmiştir.

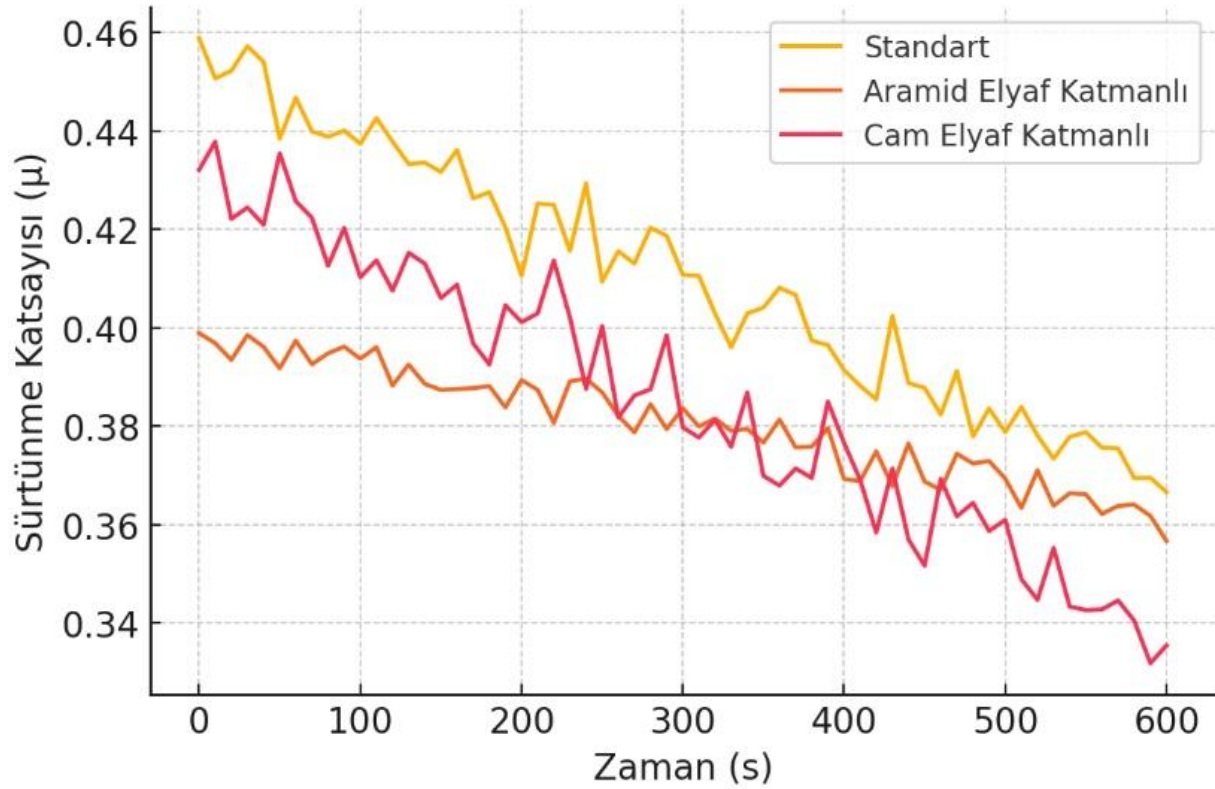
Test düzeneği ve koşulları: Sürtünme ve aşınma testleri pin-on-disk tipinde bir tribometre üzerinde gerçekleştirilmiştir. Disk olarak tipik bir fren diski malzemesi olan grafit dökme demir (pik döküm, %3.3 C) kullanılmıştır. Dökme demir disk yaklaşık 100 mm çapında ve 10 mm kalınlığındadır (HB 180 sertlik). Pin olarak hazırlanan balata numuneleri disk üzerine dik olarak belirli bir kuvvet ile bastırılmış ve disk döndürülerek sürtünme sağlanmıştır. Tüm testlerde oda sıcaklığında kuru koşullar kullanılmıştır (bağıl nem %50). Uygulanan normal yük 20 N olarak seçilmiştir (1.5 MPa ortalama yüzey basıncı). Disk dönme hızı 200 d/dk olarak ayarlanmış, bu da disk dış çapında yaklaşık 1 m/s çevresel kayma hızına tekabül etmektedir. Her bir deney süresi 10 dakika olarak belirlenmiş, bu süre boyunca pin ile disk arasındaki sürtünme kuvveti yük hücresi ile sürekli ölçülerek sürtünme katsayısı (μ) gerçek zamanlı olarak hesaplanmıştır. Test sırasında disk ile numune arasındaki temas bölgesi yakınında bir termokupl yardımıyla anlık yüzey sıcaklığı izlenmiş ve maksimum sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Her bir numune tipi için en az üç tekrar testi yapılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Aşınma ölçümleri: Deney öncesinde tüm pin numuneler hassas terazide (± 0.1 mg) tartılmış, test sonunda yeniden tartılarak kütle kaybı hesaplanmıştır. Sürtünme testleri sonrasında numunelerin aşınmış yüzeyleri stereo mikroskop altında gözlemlenerek aramid ve cam elyafların aşınma davranışına etkileri nitel olarak değerlendirilmiştir.

3. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Sürtünme katsayısının zamanla değişimi: Görsel 1’de standart ve tekstil ara tabakalı balata numunelerinin sürtünme katsayısı (μ) ile zaman grafikleri verilmiştir. Standart balata numunesi, teste ilk başta $\mu \approx 0.45$ gibi göreceli yüksek bir sürtünme katsayısı ile başlamış, ardından ilk birkaç dakika içinde sürtünmede bir miktar azalma eğilimi gözlenmiştir. Test sonunda standart numunenin sürtünme katsayısı 0.37 seviyesine inmiştir. Buna karşın aramid elyaf ara tabakalı numune, başlangıçta 0.40 civarında bir sürtünme katsayısı üretmiş ve test boyunca bu değeri etrafında oldukça kararlı bir seyir izlemiştir. 10 dk sonunda aramid takviyeli numunenin sürtünme katsayısı yaklaşık 0.36 değerine ulaşarak başlangıca kıyasla sadece 0.04’lük küçük bir düşüş sergilemiştir. Cam elyaf katmanlı numune ise ilk sürtünme değeri 0.43 ile standart numuneye benzer bir seviyede başlamış olmasına rağmen sürtünme katsayısı zamanla daha belirgin bir azalma göstermiş ve test bitiminde 0.34 değerine kadar düşmüştür. Üç numune arasında cam elyafli olan, sürtünme katsayısındaki düşüşün en belirgin olduğu durumdur. Ayrıca, Görsel 1’den görülebileceği gibi sürtünme katsayısındaki anlık dalgalanmalar (titreşimler) açısından da numuneler arasında farklar bulunmaktadır: Aramid elyaf ara tabakalı numunenin μ -t grafiği en düzgün seyri gösterirken, cam elyafli ve standart numunelerde sürtünme katsayısında daha belirgin küçük dalgalanmalar meydana

gelmiştir. Bu durum, aramid ara tabakasının sürtünme sırasında oluşan mikro titreşimleri ve salınımları sönmlemede daha etkili olduğunu düşündürmektedir.



Görsel 1. Farklı balata numuneleri için sürtünme katsayısının zamana göre değişimi (pin-on-disk testi, 20 N, 1 m/s, oda sıcaklığı)

Yukarıdaki gözlemler, aramid elyaf içeren ara tabakanın fren balatası yüzeyinde sürtünme stabilitesini artırdığına işaret etmektedir. Aramid takviyeli numunenin sürtünme katsayısı, test süresince neredeyse sabit kalmış ve standart numuneye kıyasla çok daha düşük bir oranda azalmıştır. Cam elyaf ara tabakalı numunede ise sürtünme katsayısının zamanla düşüş eğilimi göstermesi, bu malzemenin sürtünme solması (fade) davranışına karşı aramid kadar direnç gösteremediğini göstermektedir. Bunun olası nedeni, cam elyafın daha sert ve kırılkan olması sebebiyle sürtünme sırasında daha agresif bir aşınma mekanizması yaratması ve yüzeyde oluşan sürtünme filminde sürekliliğin bozulması olabilir. Bu çalışmada test sıcaklıkları nispeten düşük olsa da, cam elyafların mikro ölçekte kırılması ve parçalanması sonucunda yüzeyde oluşan üçüncü gövde tabakasının kararlılığının, aramid liflerine kıyasla daha zayıf olduğu düşünülebilir.

Aşınma ve yüzey sıcaklığı: Deneyler sonrasında numunelerin kütle kaybı ölçümleri Çizelge 1’de verilmiştir. Standart balata numunesi en yüksek aşınmayı göstermiş; 10 dakikalık test sonunda ortalama 60 mg malzeme kaybına uğramıştır. Aramid elyaf ara tabakalı numunenin aşınma miktarı ise belirgin biçimde daha düşüktür: Yaklaşık 30 mg kütle kaybı ile standart numunenin yarısı kadar aşınma gözlenmiştir. Cam elyaf ara tabakalı balata numunesi ise 45 mg civarında aşınma ile aramid katkılı ile standart numune arasında bir değer almıştır. Bu sonuçlar, aramid takviyesinin aşınma direncini artırmada cam elyafa kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir. Aramid lifleri,

yumuşak yapıları sayesinde hem üçüncü gövde tabakasını daha sürekli kılmakta hem de aşındırıcı parçacık oluşumunu azaltarak balata yüzeyini korumaktadır. Cam lifleri ise kırılarak yüzeyde kalıcı platolar oluştursa da bu kırılma esnasında oluşan sert parçacıklar bir miktar aşındırıcı etki yaratabilir. Ayrıca aramid liflerinin matrise tutunması cam liflere göre daha iyidir; liflerin çekilip kopması zor olduğu için malzeme kaybı azalır. Cam liflerde ise aderans zayıfsa lif kopup ayrılabilir veya kırık cam parçacıkları koparak balatadan uzaklaşabilir. Bu mekanik farklılıklar, aramid ve cam elyaf katkılarının aşınma miktarına yansıyan farklı etkilerini açıklayabilir.

Yüzey sıcaklığı verileri incelendiğinde, cam elyaflı numunenin test esnasında en yüksek sıcaklığa ulaştığı görülmüştür (yaklaşık 130 °C). Standart numune 125 °C maksimum yüzey sıcaklığına erişirken, aramid elyaflı numunenin en yüksek sıcaklığı 115 °C ile diğerlerine göre daha düşük kalmıştır. Bu fark, cam elyaflı numunenin özellikle testin ilk başındaki yüksek sürtünme düzeyi nedeniyle daha fazla ısı üretmesine bağlanabilir. Aramid elyaflı numunede ise sürtünme katsayısının biraz daha düşük ve stabil olması ile aramid liflerin ısı iletkenliğinin düşüklüğü (izolatör özelliği) birleşerek yüzey sıcaklığının aşırı yükselmesini engellemiştir. Öte yandan, aramid liflerin ısıya dayanımı da yüksektir (aramid elyaf 500 °C'nin üzerinde ayrılmaya başlar), bu nedenle test boyunca yapısal bütünlüklerini koruyarak balata yüzeyinde ısıdan kaynaklı performans kaybını minimize etmiş olabilirler. Cam elyaf ise 600 °C civarında yumuşamaya başlasa da, daha kırılğan olduğu için artan sıcaklıklarda yapıdan koparak ayrılabilir; ancak bizim test sıcaklıklarımız bu seviyelere ulaşmadığından esas etki lif kırılğanlığından ziyade sürtünme seviyesinin yüksekliğiyle ilgilidir.

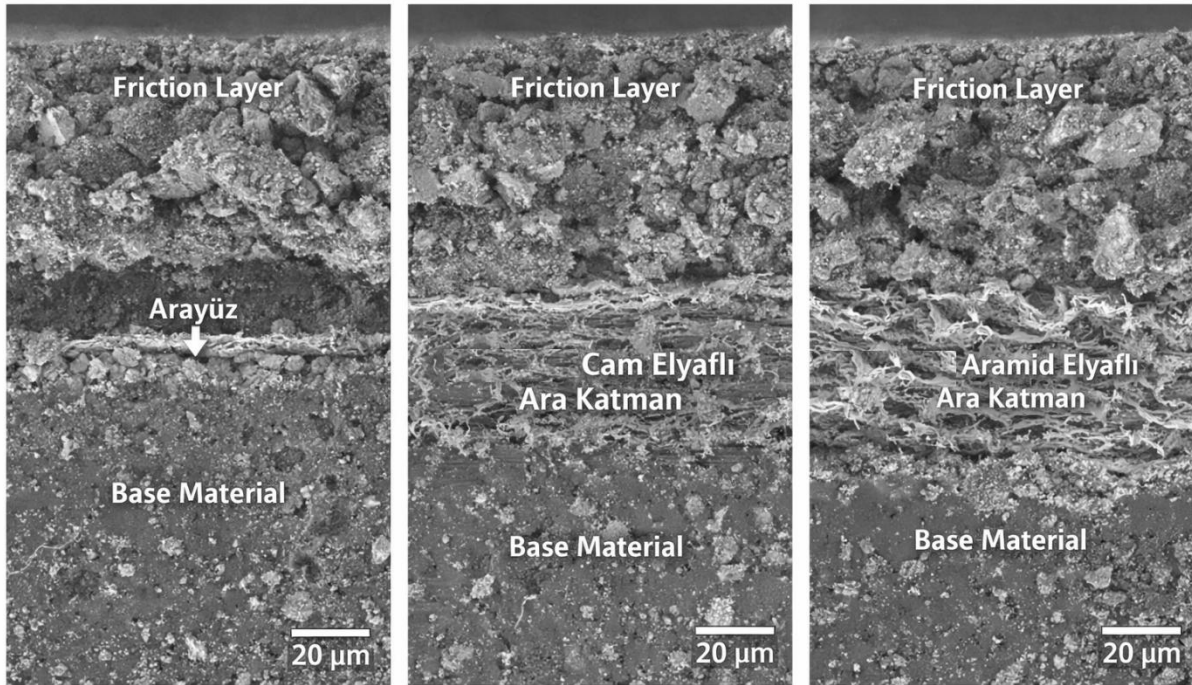
Çizelge 1. Farklı numuneler için ortalama sürtünme katsayısı (μ), aşınma miktarı ve maksimum yüzey sıcaklığı sonuçları

Numune	Ortalama μ	Aşınma (mg)	Maks. sıcaklık (°C)
Standart balata	0.41	60	125
Aramid elyaf	0.38	30	115
Cam elyaf	0.39	45	130

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde, aramid elyaf ara tabaka uygulamasının balatanın hem sürtünme hem de aşınma performansını olumlu etkilediği görülmektedir. Aramid katkılı balatanın ortalama sürtünme katsayısı, standart balata ile benzer seviyede olmakla birlikte (bir miktar daha düşük) oldukça stabil bir değerdir. Bu numunenin aşınma miktarı açık ara en düşüktür. Cam elyaflı balata ise ortalama sürtünme katsayısı bakımından standart balata ile benzer veya hafif daha yüksek bir değer yakalamış, ancak bu değeri koruyamayarak sürtünme performansında düşüş yaşamıştır; buna rağmen aşınma açısından standart balataya göre daha iyi performans göstermiştir.

Mikroyapı gözlemleri: Deney sonrası balata numunelerinin aşınmış yüzeylerine SEM altında bakıldığında (Görsel 2), aramid elyaf içeren tabakanın yüzeyinde kesintisiz bir film ve yapışık aşınma kalıntıları gözlenmiştir. Aramid liflerin çoğunlukla matris içinde tutulduğu, yüzeyde ergimiş reçine ve ince artıklarla birlikte lif uçlarının görülebildiği

tespit edilmiştir. Bu, aramid liflerinin aşınma sırasında yapıyı bir arada tutarak sürtünme filmine katkı sağladığını göstermektedir. Cam elyaflı numunede ise yüzeyde daha parlak ve düzleşmiş bölgeler dikkat çekmiştir. Muhtemelen sürtünme sırasında cam liflerin bir kısmı ufalanarak yüzeyde sert bir film tabakası oluşturmuştur. Ancak bizdeki cam elyaflı yüzeyde, kırılmış cam parçacıklarının oluşturduğu film tabakasının yer yer disk yüzeyinin metalik parlaklığı ile karışık bir mozaik desen oluşturduğu görülmüştür. Bu da cam lif kaynaklı üçüncü gövde tabakasının aralıklarla koparak yenilendiğine, dolayısıyla sürtünmenin aramid kadar pürüzsüz olmadığına işaret eder. Özetle, aramid elyaf yapışkan ve sünek doğasıyla aşınma esnasında bir ağ gibi davranıp sürtünme yüzeyini stabilize ederken, cam elyaf sert ve kırılğan yapısıyla yüksek sürtünme sağlamakla birlikte bu sürtünmeyi tam stabilize edememektedir. Yine de her iki takviye de toplam aşınma miktarını azaltmış, bu da metal disk yüzeyinin korunmasına yardımcı olabilecek olumlu bir gelişmedir.



(a) Standart Numune

(b) Aramid Elyafli Katmanlı Numune

(c) Cam Elyafli Katmanlı Numune

Görsel 2. Numunelerin karşıt yüzey ile etkileşimlerinin SEM görüntüleri

4. GENEL DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

Bu çalışmada fren balatası sürtünme yüzeyine entegre edilen aramid ve cam elyaflı ince tekstil ara tabakalarının sürtünme stabilitesine etkileri incelenmiştir. Elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenebilir:

- Aramid elyaf ara tabakası, fren balatasının sürtünme katsayısının zamanla daha sabit kalmasını sağlamıştır. Aramid takviyeli numune, 10 dakikalık test boyunca sürtünme performansını neredeyse korumuş, sürtünme katsayısında minimum düzeyde bir düşüş

yaşanmıştır. Bu, frenleme sırasında tutarlı ve öngörülebilir bir sürtünme kuvveti elde etmek açısından önemli bir kazanımdır.

- Cam elyaf ara tabakası kullanımı, başlangıçta yüksek bir sürtünme katsayısı değeri sağlasa da sürtünme katsayısındaki düşüşü engellemede aramid kadar etkili olmamıştır. Cam elyaf takviyeli balata, test sonuna doğru belirgin bir *fade* yaşayarak sürtünme katsayısında düşüş göstermiştir. Bununla birlikte, cam elyaf katkısı da aşınma miktarını azaltmış, standart balataya kıyasla daha iyi bir aşınma direnci sunmuştur.
- Aşınma sonuçları, aramid elyafli tekstil katmanın balata malzemesinin aşınma direncini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Aramid takviyesi, numunede yarı yarıya daha az malzeme kaybı ile sonuçlanmıştır. Bu durum, fren balatasının servis ömrünü uzatmak ve bakım sıklığını azaltmak açısından avantaj sağlayabilir. Cam elyafli katman da aşınmayı bir miktar azaltmıştır ancak etkinliği aramid kadar yüksek değildir.
- Aramid ve cam elyaf ara tabakaları, balata yüzeyinde farklı etki mekanizmaları sergilemektedir. Aramid lifler, sürtünme sırasında yapıyı bir arada tutan sünek bir ağ gibi davranarak kararlı bir sürtünme filmi oluşturmakta, mikro düzeydeki titreşim ve dalgalanmaları sönmölemektedir. Cam lifler ise sert plakalar şeklinde yüzeyde kalarak sürtünmeye katılmakta ve yüksek başlangıç sürtünmesi sağlamaktadır; ancak kırılmalıkları nedeniyle süreklilikleri kısmen sınırlı kalmaktadır.
- Yüzey sıcaklığı ölçümleri, aramid takviyesinin balata yüzey sıcaklığını bir miktar düşürdüğünü, cam takviyenin ise başlangıçta daha fazla ısı ürettiğini göstermiştir. Daha kararlı sürtünme sayesinde aramid katman, ısı birikimini de azaltarak olası termal sorunları hafifletebilir.
- Sonuç olarak, aramid elyafli ince tekstil ara tabaka, fren balatası uygulamalarında sürtünme stabilitesini iyileştirmek ve aşınmayı azaltmak için umut vaat eden bir yöntemdir. Bu çalışmanın bulguları, özellikle yüksek performans ve güvenilirlik gerektiren fren sistemlerinde (örneğin elektrikli araçlar veya ağır taşıtlarda) balata yüzeyine entegre lifli katmanların kullanımının potansiyel faydalarını ortaya koymaktadır.

Öneriler ve gelecekteki çalışmalar: İlerleyen araştırmalarda farklı tip ve kalınlıktaki tekstil ara tabakalar (örneğin karbon elyaf, bazalt elyaf veya hibrit dokuma yapılar) incelenebilir. Ayrıca, bu çalışmada tek bir sabit yük ve hızda yapılan testlerin yerine, gerçekçi frenleme senaryolarını yansıtmak üzere değişken sıcaklık, basınç ve hız koşullarında (örneğin fren fade ve recovery testleri) aramid/cam ara tabakalı balataların performansı değerlendirilmelidir. Ara tabakanın balata malzemesine bağlantı dayanımı ve uzun süreli termal dayanımı da kritik olduğundan, ara yüzey aderansı ve yorulma davranışı gelecekte incelenmesi gereken konular arasındadır. Uygulama açısından, üretim sürecine entegre edilecek böyle bir tekstil katmanın maliyet ve üretilebilirlik boyutu da değerlendirilmeli, optimal tasarım parametreleri belirlenmelidir. Son olarak, fren balatası

aşınmasıyla ortama yayılan partiküllerin boyut ve toksisite özellikleri üzerinde lifli ara tabakaların bir etkisi olup olmadığı da çevresel faydalar yönünden araştırılmaya değerdir.

KAYNAKÇA

- [1] Essam, M. A., Abdeltawab, N. M., Shash, A. Y., El-Sayed, M. M. Investigation of mechanical properties and performance of automotive brake pads. Scientific Reports, 15(1), 32218, 2025.
- [2] Aranganathan, N., Mahale, V., Bijwe, J. Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests, Wear, 354–355, 69–77, 2016.
- [3] Monreal-Pérez, P., Lopez, D., Sola, I., Erroz, P. The role of glass fiber morphology on the friction behavior and wear mechanism of low steel-NAO hybrid railway brake shoes. Tribology International, 178, 108079, 2022.
- [4] <https://www.frenossaulea.com/woven> (Erişim tarihi: 23.01.2026).

**PET BAZLI OTOMOTİV KOLTUK KUMAŞINDA UYGULANAN HALOJENLİ ve
HALOJENSİZ ALEV GECİKTİRİCİ BİTİM İŞLEMLERİNİN YANICILIK ve
DUMAN PERFORMANSINA ETKİLERİ**

Doç.Dr., Özlem ERDEM YILMAZ

Çukurova Üniversitesi

ozlemerdem@cu.edu.tr - 0000-0002-0976-2162

Doç.Dr., Ali Can YILMAZ

Çukurova Üniversitesi

acyilmaz@cu.edu.tr - 0000-0001-9832-9880

ÖZET

Otomotiv koltuk döşemelerinde yangın güvenliği açısından alev geciktirici özellik zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmada, %100 PET (polyester) bazlı bir otomotiv koltuk kumaşına uygulanan halojen içerikli ve halojen içermeyen iki farklı alev geciktirici bitim işleminin kumaşın yanıcılık davranışı (alev alma/sona erme performansı) ve duman yoğunluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmada kumaş numunelerine (1) bromlu bileşik esaslı halojenli alev geciktirici apre ve (2) fosfor/azot esaslı halojensiz alev geciktirici apre uygulanmış; ayrıca apresiz kontrol numunesi referans olarak kullanılmıştır. Tüm numuneler sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) testi, dikey yanma testi (alev sönme ve koruma süreleri ölçülerek) ve duman yoğunluğu testi (NBS duman odası) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre halojenli apre uygulanan kumaşın LOI değeri kontrol numuneye kıyasla belirgin şekilde yükselerek %21'den %28'e çıkmış, dikey yanma testinde numune kendiliğinden sönerken alev sönme süresi ihmal edilebilir düzeye inmiştir. Halojensiz apre uygulanan kumaşta LOI %26'ya yükselmiş ve numune yine kendiliğinden sönmüştür; ancak halojenli sisteme kıyasla bir miktar daha uzun bir süre (yaklaşık 2–3 sn) yanmaya devam etmiştir. Duman testi sonuçları, halojenli alev geciktiricinin yanma sırasında en yüksek duman yoğunluğunu oluşturduğunu, halojensiz sistemin ise duman oluşumunu belirgin biçimde azalttığını göstermiştir. Genel olarak her iki alev geciktirici bitim işlemi de kumaşın tutuşma direncini artırarak dikey yanma test kriterlerini sağlamış, ancak halojen içermeyen sistem daha düşük duman ve toksik gaz üretimiyle öne çıkmıştır. Sonuçlar, otomotiv tekstillerinde halojensiz alev geciktiricilerin yangın güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından avantajlı bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alev geciktirici bitim, otomotiv koltuk kumaşı, duman yoğunluğu

1. GİRİŞ

Otomotiv iç döşeme tekstilleri, olası bir araç yangınında alev yayılımını sınırlamak ve yolcu güvenliğini artırmak amacıyla belirli yanmazlık/alev geciktiricilik kriterlerini sağlamalıdır [1]. Polyester (PET) koltuk kumaşları düşük LOI değerleri nedeniyle ortam havasında kolay tutuşabilen malzemeler sınıfındadır ve bu nedenle kimyasal bitim işlemleri ile güç tutuşur hale getirilmesi yaygın bir uygulamadır [2]. Alev geciktiricilik performansı çoğunlukla LOI, dikey yanma (afterflame/afterglow) ve duman yoğunluğu gibi standart metriklerle değerlendirilir; pratikte malzemenin yalnızca alev almayı geciktirmesi değil, aynı zamanda duman üretimini de sınırlaması kritik kabul edilir.

Alev geciktirici sistemler genel olarak halojenli ve halojensiz olarak sınıflandırılmaktadır. Halojenli (özellikle bromlu/klorlu) sistemler gaz fazında radikal yakalama mekanizmasıyla yüksek etkinlik sağlasa da yanma sırasında yoğun duman ve koroziv/toksik gaz oluşumu açısından dezavantajlıdır [3]. Halojensiz (fosfor/azot esaslı) sistemler ise çoğunlukla katı fazda kömürleşme/şişme ile bariyer oluşturup ısı ve kütle transferini kısıtlayarak yanmayı baskılar; bu yaklaşımın duman yoğunluğunu azaltma potansiyeli literatürde sık vurgulanmaktadır [4]. Bu çalışma, PET bazlı otomotiv koltuk kumaşında halojenli ve halojensiz iki bitim sisteminin LOI, dikey yanma ve duman yoğunluğu ölçütleri açısından karşılaştırmalı performansını deneysel olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Malzeme: Çalışmada kullanılan kumaş, otomotiv koltuk döşemelerinde yaygın olarak tercih edilen %100 polyester (PET) esaslı bir döşemelik kumaştır. Kumaş düz dokuma yapıda olup yaklaşık 300 g/m² yüzey yoğunluğuna ve LOI $\approx$ 21% değerine sahiptir (apre uygulanmamış ham hali yanıcılığa açıktır). Kumaş numuneleri 30 cm $\times$ 30 cm boyutlarında kesilerek deneylerde kullanılmıştır.

Alev geciktirici bitim işlemleri: Kumaşlara biri halojen içeren, diğeri halojen içermeyen iki farklı alev geciktirici kimyasal apre uygulanmıştır. Halojenli sistem, brom bazlı organik bir alev geciktirici katkı (dekabromodifenil etan) ile antimon trioksit sinerjik ajanının kombinasyonunu içermektedir. Bu halojenli apre formülasyonu, su bazlı bir bağlayıcı polimer (akrilik dispersiyon) içerisinde %10 aktif solid madde olacak şekilde hazırlanmıştır. Halojensiz sistem ise fosfor ve azot içeren organik bir alev geciktirici (amonyum polifosfat ve melamin türevleri kombinasyonu) içermektedir. Halojensiz apre formülü de benzer şekilde su bazlı bir polimerik bağlayıcı içinde %15 toplam katı madde oranında hazırlanmıştır. Her iki apre kimyasalı, üretici tavsiyelerine göre tartılarak karıştırılmış ve kumaşlara empirme (pad-dry-cure) yöntemiyle uygulanmıştır. Empirme işlemi sırasında kumaşlar hazırlanan apre çözeltilerine daldırılıp çıkarıldıktan sonra 2 bar sıkma basıncı ile fazla çözelti alınmış, ardından 110°C’de 5 dakika kurutulmuş ve 150°C’de 3 dakika fikse edilmiştir. İşlem sonunda kumaş numunelerinde yaklaşık %8 oranında halojenli kimyasal fikse olurken, halojensiz formülasyonda %10 civarında bir kimyasal fikse oranı elde edilmiştir (farklı özgül ağırlık ve viskozite nedeniyle halojensiz aprede biraz daha yüksek add-on oluşmuştur). Hazırlanan numune grupları: Kontrol

(K) – apre uygulanmamış ham PET kumaş; Halojenli FR (H) – halojenli apre uygulanmış kumaş; Halojensiz FR (HZ) – halojen içermeyen apre uygulanmış kumaş şeklindedir.

Test yöntemleri: Apre uygulanmış ve kontrol numunelerin yanma davranışını nicel olarak değerlendirmek üzere üç farklı test gerçekleştirilmiştir.

(i) LOI testi: ASTM D2863 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu testte, dikey yönde tutulan 150×50 mm boyutlarındaki numune, üst kenarından tutuşacak şekilde yakılır ve etrafından geçen oksijen/azot gaz karışımındaki oksijen yüzdesi yavaş yavaş azaltılarak numunenin kendi kendine yanmayı sürdürmeyi kestiği en düşük oksijen konsantrasyonu belirlenir. Her bir numune grubu için üç tekrar testi yapılarak ortalama LOI değeri hesaplanmıştır.

(ii) Dikey yanma testi: ASTM D6413 standardı protokolü izlenerek yapılmıştır. 300×75 mm ebatlarında dikey olarak asılmış numunenin alt kenarı, standart boyutta bir alev ile 12 saniye süreyle yakıcı aleve maruz bırakılmıştır. Bu süre sonunda numuneye uygulanan alev çıkarılmış ve numunenin yanmaya devam ettiği süre kronometre ile ölçülmüştür (afterflame, alev sönme süresi). Ayrıca numunenin kor halinde yanmaya (közlenmeye) devam ettiği süre (afterglow, korlaşma süresi) ayrı olarak kaydedilmiştir. Test sırasında eriyerek damlama olup olmadığı ve numunenin yanma sonucu ne kadar uzunlukta kömürleştiği (char uzunluğu) de gözlemlenmiştir. Her bir numune türü için 5 tekrar yapılarak ortalama afterflame ve afterglow süreleri not edilmiştir.

(iii) Duman yoğunluğu testi: ASTM E662 standardına göre NBS (National Bureau of Standards) duman yoğunluğu odasında gerçekleştirilmiştir. $75 \times 75 \times 3$ mm boyutlarında numune parçaları dikey yerleştirilerek, spesifik bir ısı akısı altında tutuşturulmuş ve kapalı hazne içinde zamanla oluşan dumanın ışık geçirgenliğini azaltma miktarı ölçülmüştür. Test alevli (flaming) koşulda yapılmış (yani numune bir pilot alev ile tutuşturulmuştur) ve 4 dakika sonunda ulaşılan maksimum optik duman yoğunluğu “Ds” değeri kaydedilmiştir. Her bir numune için 3 tekrar yapılarak ortalama maksimum duman yoğunluğu değeri raporlanmıştır.

Elde edilen veriler halojenli ve halojensiz bitim işlemlerinin karşılaştırmalı analizi için kullanılmıştır. Ayrıca, deney sırasında numunelerin yanma esnasındaki davranışları (alev alma şekli, damlama, duman rengi vb.) nitel olarak gözlemlenmiş ve not edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yanıcılık testleri sonuçları (LOI ve dikey yanma): Kontrol grubundaki apresiz PET kumaşın LOI değeri ortalama %21 olarak ölçülmüştür. Bu düşük değer, polyester malzemenin normal hava atmosferinde kolaylıkla alev alacağını doğrulamaktadır. Nitekim kontrol numunesi dikey yanma testinde ilk tutuşma sonrasında dış alev kaynağı uzaklaştırıldığında da yanmaya devam etmiş ve numunenin tamamı birkaç saniye içinde yanarak tüketmiştir (alev sönme süresi ~10 saniye, detaylı değerler Çizelge 1’de verilmiştir). Alev geciktirici bitim işlemleri sonrasında ise LOI değerlerinde belirgin artışlar elde edilmiştir. Halojenli apre uygulanmış numunenin LOI değeri %28 olarak bulunmuştur. Bu değer, malzemenin oksijen atmosferi yaklaşık %28’in altına düşmedikçe kendi kendine yanmayı sürdüremeyeceğini gösterir ki, bu da halojenli apreli kumaşın artık güç tutuşur sınıfa geçtiğini teyit etmektedir. Halojensiz apre uygulanmış numunenin LOI değeri ise %26 olarak ölçülmüştür. LOI’nin %26 seviyesine çıkarılması

literatürde tipik olarak kendiliğinden sönme eşiği olarak verilmektedir [2]. Bu durumda halojensiz apreli kumaş da kritik eşiği sağlayarak güç tutuşur hale gelmiştir, ancak halojenli sistem kadar yüksek bir oksijen indeksi sunamamıştır.

Dikey yanma testindeki gözlemler LOI sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Kontrol numune, dikey alev maruziyeti sırasında hızla tutuşmuş ve alev kaynağı çekildikten sonra da önemli bir süre yanmaya devam etmiştir. Yaklaşık 10 saniye boyunca numune alevli yanmayı sürdürmüş, bu esnada eriyen polyester damlacıkları zemine akmıştır. Yanan damlacıklar test platformunda ek yangın yükü oluşturabilecek potansiyele sahiptir; nitekim eriyik damlaması polyester gibi termoplastiklerin yangın riskini artıran bir faktördür. Kontrol kumaş, 10 sn sonunda tamamen tükenerek sönerken geride neredeyse hiç katı kalıntı (kömür) bırakmamıştır. Halojenli FR apreli numune ise alev uygulama süresi sonunda kendiliğinden sönmüş; afterflame (alev sönme süresi) değeri ortalama yalnızca 2 saniye olarak kaydedilmiştir. Bu süre zarfında numune üzerinde alev hızla azalarak sönmüş, yanma yalnızca kumaşın alt kısmında küçük bir kömürleşmiş kısım ile sınırlı kalmıştır. Halojenli apreden dolayı numune alev alır almaz bromlu bileşiklerin gaz fazına geçerek serbest radikalleri baskıladığı ve bu sayede reaksiyonu durdurduğu düşünülmektedir [5]. Halojenli numunede apre kaplaması kumaş yüzeyinde bir bariyer oluşturmuş ancak eriyen kısım küçük damlalar şeklinde akmıştır. Damlalar yanarak düştüğü için test düzeneğinde ikincil yanma görülmüştür. Halojenli numunenin afterglow (korlaşma süresi) değeri “0 saniye” olarak kaydedilmiştir; alev söndükten sonra kumaş közü parlamamış, yanma tamamen sona ermiştir. Numune üzerinde kalan kömürleşmiş uzunluk ~5 cm olup, alevin sadece alt uç kısmında sınırlı kaldığını göstermektedir. Halojensiz FR apreli numune de dikey alev maruziyetine karşı son derece başarılı bir performans sergilemiştir. Alev kaynağı çekildikten sonra ortalama 3 saniye daha alev gözlenmiş ve numune kendiliğinden sönmüştür. Halojensiz formülasyonun içerdiği fosforlu bileşiklerin ısı etkisiyle ayrılarak fosforik asit türevleri oluşturduğu ve bunların da kumaş üzerinde karbonlu bir koruyucu tabaka meydana getirerek alevin yayılmasını durdurduğu düşünülmektedir [6]. Bu numunede alev sönmesinden sonra çok kısa süreli (1–2 sn) bir korlaşma gözlenmiş ancak hızlıca sönmüştür. Halojensiz apreli kumaşın damlama yapmadığı dikkat çekmiştir; muhtemelen oluşan kömür tabakası eriyen polimerin damlamasını kısmen engellemiştir. Kömürleşmiş uzunluk ~8 cm civarında ölçülmüştür ki bu, halojenli numuneye göre biraz daha fazla yanma yayılımı olduğunu gösterse de halen oldukça sınırlıdır. Sonuç olarak her iki alev geciktirici işlem de kumaşın dikey konumda kendi kendine yanma eğilimini ortadan kaldırmış, sadece numunenin alt bölümünde sınırlı bir yanma gerçekleşmiş ve sonlanmıştır. Özellikle halojenli apreli kumaşın dikey yanma test performansı, bir otobüs koltuk kumaşı üzerinde kimyasal işlem uygulanmasıyla elde edilen benzer şekilde düşük yanma hızları ve yüksek LOI değerleri rapor eden literatürle uyumludur [2].

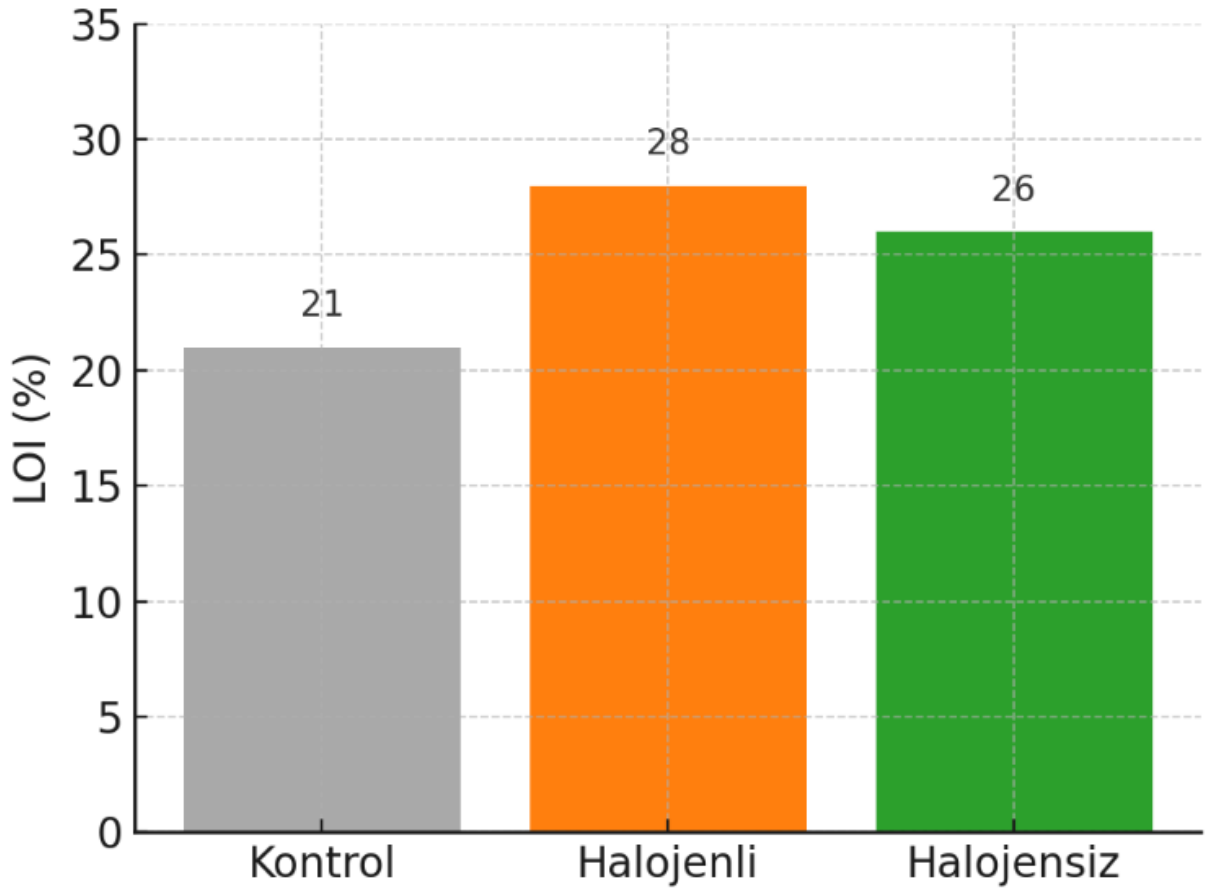
Duman yoğunluğu sonuçları: Farklı numunelerin yangın sırasındaki duman üretme potansiyeli, NBS odası testinden elde edilen maksimum duman yoğunluğu (Ds) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 1’de görüldüğü üzere kontrol numune yanma sırasında oldukça yüksek seviyede duman üretmiştir (Ds ~450). Polyester malzemenin yanmasıyla oluşan duman siyah renkte ve yoğundur; bu beklenen bir durumdur çünkü yanma sırasında polimer yapısı büyük oranda parçalanarak havaya ince karbon parçacıkları (is) ve aromatik bileşikler

yaymaktadır. Halojenli alev geciktirici kullanılmış numune ise en yüksek duman yoğunluğu değerine ulaşmıştır (Ds ~600). Bu dikkat çekici sonuç, halojenli alev geciktiricilerin yanmayı kimyasal olarak bastırırken, yanma verimini düşürmesi ve yoğun is oluşumuna neden olması ile açıklanabilir [3]. Halojenli sistemde alev kısa sürede sönmüş olsa da, alevli yanmanın devam ettiği birkaç saniyelik süre zarfında ciddi miktarda opak duman oluşmuştur. Bromlu/klorlu bileşikler yanma sırasında yakıcı HBr ve HCl gazları da açığa çıkardığından, dumanın optik yoğunluğuna ek olarak toksisiteleri de yüksektir. Bu durum, halojenli alev geciktiricilerin yangın esnasında görüşü engelleyerek tahliyeyi zorlaştırabileceği ve solunum yoluyla zehirlenme riskini artırabileceği anlamına gelir. Halojensiz alev geciktirici uygulanmış numune ise en düşük duman yoğunluğunu sergilemiştir (Ds ~300). Fosfor-azot bazlı şişici sistem, yukarıda değinildiği gibi yanma sırasında koruyucu bir köpüksü kömür tabakası oluşturarak polimerin tamamının yanmasını engellemiş, böylece ortaya çıkan yanma ürünlerini ve is parçacıklarını önemli ölçüde azaltmıştır. Elde edilen Ds değerleri, halojensiz sistemin kontrol numuneye kıyasla yaklaşık %33 oranında daha az duman ürettiğini, halojenli sistemin ise en fazla dumanı ürettiğini göstermektedir.

Çizelge 1. Farklı bitim işlemlerine tabi tutulan PET kumaş numunelerinin LOI, dikey yanma ve duman yoğunluğu test sonuçları (ortalama değerler)

Örnek	LOI (%)	Alev sönme süresi (sn)	Maks. duman yoğunluğu (Ds)
Kontrol (K)	21	10	450
Halojenli FR (H)	28	2	600
Halojensiz FR (HZ)	26	3	300

Yukarıdaki sonuçlar, halojenli sistemin yanıcılık performansını en üst düzeyde iyileştirdiğini ancak duman performansı açısından en olumsuz etkiyi yaptığını göstermektedir. Halojensiz sistem ise yanmayı önlemede biraz daha düşük bir etkinlik gösterse de (birkaç puan daha düşük LOI, 1-2 saniye daha uzun alev sönme süresi) duman ve gaz emisyonları bakımından çok daha avantajlıdır. Görsel 1, her üç numunenin LOI değerlerini grafiksel olarak karşılaştırmaktadır. Kontrol kumaşın LOI'sinin düşük olduğu, her iki alev geciktirici apre sonrası ise değerlerin belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Halojenli sistemin LOI'yi halojensiz sisteme kıyasla bir miktar daha fazla artırdığı, bunun da literatürde halojenli bileşiklerin alev geciktirmede oldukça yüksek gaz-fazı etkinlik göstermesiyle örtüştüğü söylenebilir. Ancak, tekrar vurgulamak gerekirse, halojenli sistemle elde edilen bu kazanım duman oluşumu pahasına sağlanmıştır. Diğer yandan halojensiz sistemin LOI'yi yükseltme mekanizması, polimerin termal bozunmasını değiştirip katı fazda koruyucu katman oluşturması şeklindedir; bu mekanizma yanmayı geciktirmenin yanı sıra dumanı da bastırdığı için özellikle yangın güvenliği açısından daha bütüncül bir koruma sağlamaktadır.



Görsel 1. Farklı bitim işlemlerine tabi tutulan kumaş örneklerinin LOI değerleri

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

PET esaslı otomotiv koltuk kumaşında uygulanan halojenli ve halojensiz alev geciktirici bitim işlemlerinin karşılaştırmalı analizi, her iki yaklaşımın da kendine özgü güçlü ve zayıf yönleri olduğunu ortaya koymuştur. Halojen içeren alev geciktirici sistem, daha düşük oranda kimyasal ile kumaşa yüksek yanmazlık sağlayarak LOI değerini yükseltmiş ve dikey yanma testinde neredeyse sıfır alev süresiyle en iyi sonucu vermiştir. Ancak bu sistem, yanma sırasında yoğun duman ve toksik gaz açığa çıkarması nedeniyle güvenlik ve çevre açısından önemli bir dezavantaja sahiptir. Halojen içermeyen (fosfor-azot bazlı) alev geciktirici ise kumaşın yanıcılığını büyük ölçüde azaltmış, LOI değerini kritik eşiğe ulaştırarak kendi kendine sönmeyi sağlamış ve kabul edilebilir düzeyde bir alev sönme süresiyle başarılı performans göstermiştir. En önemlisi, halojensiz sistem duman yoğunluğunu belirgin biçimde düşürmüş ve zehirli gaz oluşumunu minimize etmiştir.

Bu bulgular ışığında otomotiv koltuk kumaşlarında halojensiz alev geciktirici bitim işlemlerinin daha uygun bir seçenek olduğu değerlendirilmektedir. Halojensiz sistemler, yangın anında sürücü ve yolcuların yoğun dumana maruz kalmasını azaltarak tahliye için daha fazla zaman tanıyabilir ve solunum kaynaklı toksik etkileri minimize edebilir. Ayrıca halojensiz alev geciktiriciler, kullanım ömürleri sonunda araç içi malzemelerin bertaraf edilmesi veya geri

dönüştürülmesi aşamalarında da çevreye daha az zarar verecektir. Halojenli sistemler her ne kadar yüksek alev geciktirme performansı sağlasa da, günümüzün sürdürülebilirlik ve insan sağlığını önceleyen yaklaşımları doğrultusunda otomotiv sektörü halojen içermeyen, çevre dostu alev geciktirici çözümlere yönelmektedir.

Uygulama açısından bakıldığında, halojensiz alev geciktirici formülasyonların maliyet ve işlem kolaylığı konularında da gelişim göstermesi önemlidir. Yeni nesil halojensiz aprelerin yıkama ve aşınma dayanımlarının artırılması, böylece uzun süreli kullanımda dahi koltuk kumaşının alev geciktirici özelliğini koruması gerekmektedir. Gelecekte, nanoteknoloji ve sürdürülebilir kimyasalların entegrasyonu ile halojensiz sistemlerin etkinliğinin daha da artacağı öngörülmektedir. Sonuç olarak bu çalışma, PET bazlı otomotiv tekstillerinde halojenli ve halojensiz alev geciktiricilerin performans farklarını ortaya koyarak, yangın güvenliği ve çevresel açıdan halojensiz sistemlerin uzun vadede daha avantajlı ve tercih edilebilir olduğunu göstermiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Ömeroğulları, Z., Kut, D. Tekstilde güç tutuşurluk. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(1), 27-41, 2012.
- [2] Erdem, Ö., Yılmaz, A. C., Coşgun, A. A new approach for improving flame retardancy of automotive interior upholstery. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 577-584, 2024.
- [3] Bader, M., Lehmann, M., Meyer, M. Phosphorous-based, halogen-free flame retardants for thin, flexible polyurethane artificial leathers. Polymers, 17(7), 841, 2025.
- [4] Turşucular, O. F. Sustainable and eco-friendly flame retardants (FR) in polyester fibers: a review. Journal of Textile Engineering & Fashion Technology, 10(6), 244-249, 2024.
- [5] Shen, J., Liang, J., Lin, X., Lin, H., Yu, J., Wang, S. The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites and their potential application in construction engineering. Polymers, 14(1), 82, 2021.
- [6] Aksoy, K. Epoksi reçinelerde kullanılan alev geciktirici bileşikler. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(2), 775-802, 2023.

**MODIFIED-ATMOSPHERE (NITROGEN-FLUSHED) PACKAGING AND
QUALITY EVOLUTION OF EXTRUDED SNACKS DURING STORAGE**

Selin ÖZTÜRK

Ege University, Institute of Sciences,
Department of Material Science and Engineering, Izmir, Turkey
E-mail: selinkadriov@gmail.com
ORCID ID : 0009-0006-1491-864X

Prof. Dr. FATMA YURT

Ege University, Institute of Nuclear Sciences,
Department of Nuclear Applications, Izmir, Turkey
E-mail : fatma.yurt.lambrecht@ege.edu.tr
ORCID ID : 0000-0002-9394-6908

ABSTRACT

Extruded corn-based chips are highly susceptible to oxidative deterioration and moisture-related changes due to their low moisture content and relatively high fat levels. This study evaluated the performance of transparent and metallized BOPP monolayer films in maintaining the stability of extruded corn chips packaged under nitrogen-based modified atmosphere conditions.

Packaging was performed at laboratory scale using a nitrogen-flushing system. Analyses were conducted on days 0, 15, and 30 of storage. Lipid oxidation was measured using the TBARS (Thiobarbituric Acid Reactive Substances) method. Headspace gas composition was monitored to assess changes in oxygen over time, and moisture content was determined for each sampling day. Packages were initially flushed to achieve a low oxygen level, and variations in headspace oxygen during storage were recorded.

The results demonstrated that metallized BOPP film provided superior oxygen barrier performance compared to transparent BOPP. Samples packaged with metallized BOPP showed a slower increase in headspace oxygen and lower TBARS values throughout storage, indicating reduced lipid oxidation. Furthermore, the metallized film exhibited enhanced moisture control relative to the transparent film.

Overall, the data confirm that packaging barrier properties are essential for maintaining the quality of extruded snack products. Among the films tested, metallized BOPP offered the most effective protection in nitrogen-flushed snack packaging applications.

Keywords: Extruded corn chips, BOPP, metallized BOPP, modified atmosphere packaging, TBARS, headspace oxygen, moisture control

JELKOT KAPLI CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİTMALZEMENİN YÜZEY DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Mak.Müh., Sude MERAL

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

sudemeral688@gmail.com - ORCID ID: 0009-0004-1528-6272

Prof. Dr., Erol FEYZULLAHOĞLU

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

efeyz@kocaeli.edu.tr- ORCID ID: 0000-0003-0739-9643

ÖZET

Bu çalışmada, jelkot kaplı cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozitlerin UV ve ozmotik yaşlanma koşulları altındaki yüzey dayanımlarındaki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler Light Resin Transfer Molding (LRTM) yöntemi ile üretilmiş ve yüzey performansları ASTM D4060 standardına uygun olarak gerçekleştirilen Taber aşınma testi ile değerlendirilmiştir. UV yaşlandırma deneylerinde numuneler belirli süreler boyunca UV ışınımına maruz bırakılmış, ozmotik yaşlandırma deneylerinde ise 80 °C sıcaklıktaki su ortamında bekletilmiştir. Yaşlandırma süresince numuneler periyodik olarak değerlendirilmiş ve aşınma indeksi değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen bulgular, hem UV hem de ozmotik yaşlanmanın jelkot kaplı CTP kompozitlerin yüzey aşınma direncini azalttığını göstermiştir. UV ışınımının jelkot tabakasında foto-oksidatif bozunmaya ve mikro çatlak oluşumuna neden olduğu; ozmotik yaşlanmanın ise su difüzyonu ve plastikleşme etkisi yoluyla yüzey mekanik özelliklerini zayıflattığı belirlenmiştir. Yaşlanma süresi arttıkça aşınma indeksi değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda, her iki yaşlandırma türünün de yüzey dayanımı üzerinde olumsuz etki oluşturduğu, ancak bozunma mekanizmalarının farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, jelkot kaplı CTP kompozitlerin servis ömrünün çevresel koşullardan önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Cam elyaf takviyeli polyester, jelkot, UV yaşlanma, ozmotik yaşlanma, Taber aşınma testi, yüzey dayanımı.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip iki ya da daha fazla bileşenin belirli bir düzen içerisinde birleştirilmesiyle oluşturulan ve tek başına kullanılan malzemelere kıyasla geliştirilmiş mühendislik özellikleri sunan çok fazlı malzemedir. Bu tür yapılarda sistem genellikle yük aktarımını sağlayan bir matris fazı ile mekanik dayanımı artıran takviye elemanlarından oluşmaktadır. Takviye elemanları mekanik dayanımı artırırken, matris fazı yük transferini sağlayarak yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunmaktadır. Takviye elemanı mekanik dayanımı artırırken, matris fazı yük transferini sağlayarak yapısal bütünlüğü korur. Düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım ve korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde kompozitler, günümüzde birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedir [2,3].

Cam elyaf takviyeli polyester kompozitler, termoset karaktere sahip polyester reçinenin cam elyaf takviyeleri ile bir araya getirilmesi sonucu oluşturulan yaygın kompozit malzeme sistemlerinden biridir. Bu yapıda cam lifler yük taşıyıcı eleman olarak görev yaparken, polyester matris fazı lifleri bir arada tutarak dış yüklerin takviye elemanlarına etkin biçimde aktarılmasını sağlamaktadır. CTP kompozitler; üretim süreçlerinin nispeten basit olması, maliyet etkinliği ve çevresel koşullara karşı kabul edilebilir dayanım göstermesi nedeniyle rüzgâr türbini kanatları, boru hatları, deniz yapıları ve otomotiv bileşenleri gibi pek çok endüstriyel alanda kullanılmaktadır [2,3].

Jelkot tabakası, kompozit üretiminde kalıp yüzeyine uygulanan ilk katman olup, nihai ürünün dış yüzeyini oluşturan koruyucu ve estetik bir kaplama görevi görmektedir. Bu katman yalnızca estetik ve düzgün bir yüzey sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ultraviyole ışınları, nem ve çeşitli kimyasal etkilere karşı bariyer görevi üstlenir. Dolayısıyla jelkot tabakasının performansı, kompozit malzemenin yüzey dayanımı ve uzun süreli servis davranışı açısından belirleyici bir faktördür [4,5].

Kompozit malzemelerin yüzey özellikleri, servis ortamında maruz kalınan çevresel ve mekanik etkiler nedeniyle zamanla değişime uğrayabilir. Özellikle UV ışınımı, nem, kimyasal ortamlar ve mekanik aşınma gibi faktörler yüzey performansını olumsuz etkileyebilir. CTP kompozitlerde yüzey dayanımı; aşınmaya, çizilmeye ve çevresel bozunmaya karşı gösterilen direnç ile değerlendirilmektedir. Bu bağlamda jelkot tabakası, hem mekanik hasarları azaltan hem de çevresel etkileri sınırlandıran ilk koruyucu bariyer olarak önemli bir rol oynamaktadır [2,3].

CTP kompozitler kullanım süreleri boyunca ultraviyole ışınımı ve nem gibi çevresel faktörlere maruz kalmaktadır. Ultraviyole ışınımı, polimer bazlı malzemelerde foto-oksidatif reaksiyonları tetikleyerek polimer zincirlerinde kırılmalara ve yüzey özelliklerinde zayıflamaya neden olabilmektedir. Bunun sonucunda özellikle jelkot tabakasında mekanik özellik kaybı ve renk değişimi gözlemlenebilir.

Diğer yandan ozmotik yaşlanma, su moleküllerinin polimer matris içerisine zamanla difüze olması sonucu oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin genel bir ifadesidir. Bu süreç,

şışme, mikro çatlak oluşumu ve lif-matris ara yüzeyinde zayıflama gibi hasarlara neden olarak kompozitin uzun dönemli dayanımını olumsuz etkileyebilir [7–10].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Numune Üretimi

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit numuneler, Light Resin Transfer Molding (LRTM) yöntemi ile üretilmiştir. LRTM, reçinenin kalıp içine kontrollü şekilde enjekte edilmesini sağlayarak düşük gözeneklilik ve yüksek yüzey kalitesi sunan kompozitler elde edilmesine imkân verir [2,3].

Üretim sürecinde ilk olarak kalıp yüzeyine jelkot tabakası uygulanmıştır. Bu tabaka, hem kompozitin dış yüzeyini oluşturmakta hem de çevresel etkilere karşı koruyucu bir bariyer görevi görmektedir. Jelkot uygulamasını takiben cam elyaf takviyeleri kalıba yerleştirilmiş ve polyester reçine kalıp boşluğuna enjekte edilmiştir. Reçinenin lifleri tamamen ıslatmasının ardından, numuneler belirlenen bekletilerek polimerizasyon [2025].



kürlenme koşullarında tamamlanmıştır (Görsel 2)

Görsel 2. LRTM yöntemi ile CTP numunelerin üretim aşaması, 2025

2.2. Numune Hazırlığı

Kürlenme işleminin tamamlanmasından sonra elde edilen kompozit levhalar, deney prosedürlerine uygun olacak şekilde standart ölçülerde kesilmiştir. Numunelerin geometrik boyutları ve yüzey özellikleri deneysel tutarlılığı sağlamak amacıyla mümkün olduğunca homojen şekilde hazırlanmıştır.

Yaşlandırma uygulanmayan numuneler kontrol grubu olarak ayrılmış, diğer numuneler ise UV ışınımı ve ozmotik yaşlandırma koşullarına belirlenen süreler boyunca maruz bırakılmıştır (Görsel 3) [2025].



Görsel 3. Jelkot kaplı CTP numune, 2025

2.3. UV Yaşlandırma Deneyi

UV yaşlandırma deneyleri, jelkot kaplı CTP kompozitlerin uzun dönemli yüzey performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Numuneler, kontrollü UV ışınımı altında belirlenen süre boyunca tutulmuş, iki günde bir ara değerlendirmeler yapılmıştır (Görsel 4) [2025].

UV ışınımının polimer sistemlerde foto-oksidatif bozunmaya yol açtığı ve yüzey özelliklerinde mekanik zayıflamaya neden olduğu literatürde bildirilmektedir [7–9]. Yaşlandırma sonrası yüzey dayanımı Taber aşınma testi ile ölçülerek, UV etkisi sayısal olarak analiz edilmiştir.



Görsel 4. UV Yaşlandırma Cihazı, 2025

2.4. Ozmotik Yaşlanma Deneyi

Ozmotik yaşlanma testleri, jelkot kaplı CTP numunelerin su ve yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarını incelemek için uygulanmıştır. Numuneler 80 °C su ortamına yerleştirilmiş ve hızlandırılmış nem yaşlandırmasına tabi tutulmuştur. Deney sırasında iki

günde bir numuneler çıkarılarak yüzey dayanımı değişimleri analiz edilmiştir (Görsel 5) [2025]. Su moleküllerinin matris içerisine difüzyonu ve ara yüzey zayıflaması, kompozit performansını etkileyebilmektedir.



Görsel 5. Ozmotik yaşlandırma düzeneği, 2025

2.5. Taber Aşınma Testi

UV ve ozmotik yaşlandırmaya tabi tutulan jelkot kaplı numunelerin yüzey aşınma dirençleri, ASTM D4060 standardına uygun olarak Taber aşınma testi ile belirlenmiştir [1]. Testlerde CS-10 aşındırıcı diskler kullanılmış ve 10.000 devir uygulanmıştır. Deneyler, Devotrans GT-7012-T model cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Görsel 6) [2025].



Görsel 6. Taber aşınma cihazı, 2025

2.6. Aşınma İndeksi Hesaplaması

Taber aşınma testi sonucunda elde edilen kütle kaybı verileri, ASTM D4060 standardında tanımlanan aşınma indeksi (Wear Index) esas alınarak hesaplanmıştır [1]. Aşınma indeksi, numunenin aşındırma öncesi ve sonrası kütle farkının toplam devir sayısına oranlanmasıyla belirlenmektedir:

$$I = ((A-B) \times 1000) / C$$

Burada:

A: Aşındırma öncesi numune ağırlığı (mg)

B: Aşındırma sonrası numune ağırlığı (mg)

C: Toplam aşındırma devri sayısı

olarak tanımlanmaktadır. Hesaplanan aşınma indeksi değerinin düşük olması, numunenin yüzey aşınmasına karşı daha yüksek direnç gösterdiğini ifade etmektedir [1].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde UV ve ozmotik yaşlandırmaya tabi tutulan jelkot kaplamalı cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit numunelerin yüzey dayanımı, Taber aşınma testi sonuçları esas alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler literatürde bildirilen bozunma mekanizmaları ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

3.1. Referans Numunelerin Aşınma Davranışı

Yaşlandırma uygulanmamış referans numuneler, jelkot kaplı CTP kompozitlerin başlangıç yüzey performansını temsil etmektedir. Taber aşınma testi sonuçlarına göre referans numuneler düşük aşınma indeksi değerleri sergilemiştir. Bu durum, jelkot tabakasının yüzey aşınmasına karşı etkin bir bariyer oluşturduğunu göstermektedir.

Jelkot kaplamanın, kompozit sistemlerde dış etkilere karşı ilk koruyucu katman olarak görev yaptığı ve yüzey performansını artırdığı literatürde belirtilmektedir [4,5]. Elde edilen düşük aşınma indeksi değerleri, jelkotun servis öncesi durumda mekanik aşınmaya karşı yeterli direnç sağladığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, jelkot kaplı kompozitlerin yüksek yüzey dayanımı gösterdiğini bildiren çalışmalarla uyumludur [7,8].

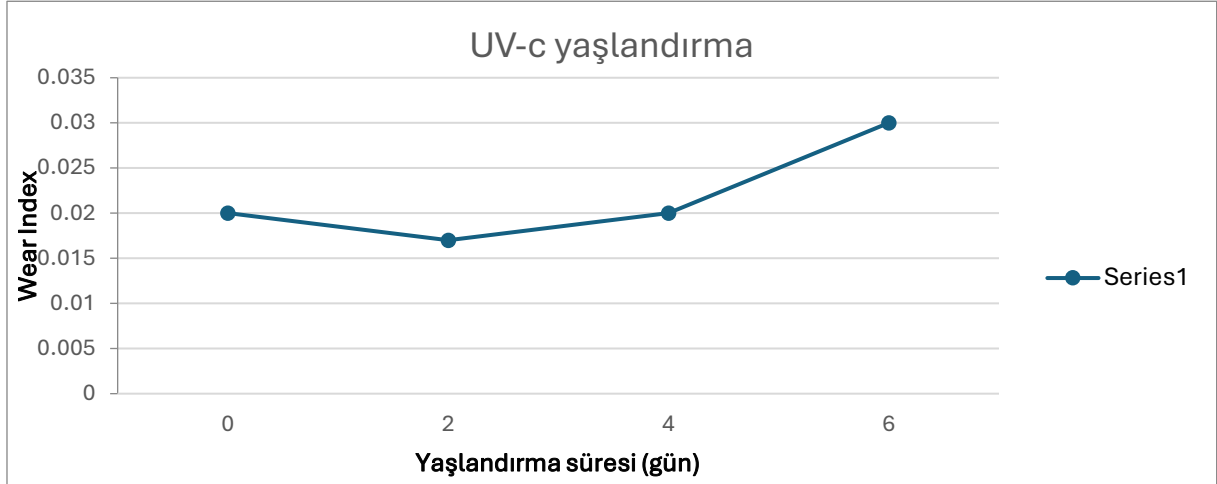
3.2. UV Yaşlanmanın Yüzey Dayanımı Üzerindeki Etkisi

UV yaşlandırma sonrası gerçekleştirilen Taber aşınma testleri, UV ışınımına maruz kalan numunelerde yüzey dayanımının referans grubuna kıyasla azaldığını göstermiştir. Aşınma indeksi değerlerindeki artış, jelkot tabakasının UV maruziyeti sonucu mekanik bütünlüğünü kısmen kaybettiğine işaret etmektedir.

Ultraviyole ışınımının polimer esaslı sistemlerde zincir kırılması, oksidatif reaksiyonlar ve mikro çatlak oluşumu gibi foto-oksidatif bozunma mekanizmalarına neden olduğu bilinmektedir [7–9]. Bu tür mikroyapısal değişimler, yüzey sertliğinin azalmasına ve aşınma direncinin düşmesine yol açabilmektedir.

Yaşlandırma süresinin artmasıyla aşınma indeksi değerlerinde kademeli bir yükselme gözlenmiştir. Bu durum, UV etkisinin zamanla birikimli (kümülatif) bir hasar mekanizması oluşturduğunu göstermektedir. Deney süresince iki günde bir yapılan ölçümler, yüzey performansındaki azalışın zamana bağlı olarak ilerlediğini ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, UV ışınımının termoset polyester esaslı jelkot kaplamaların yüzey özelliklerini olumsuz etkilediğini rapor eden literatür çalışmaları ile paralellik göstermektedir [7,8].



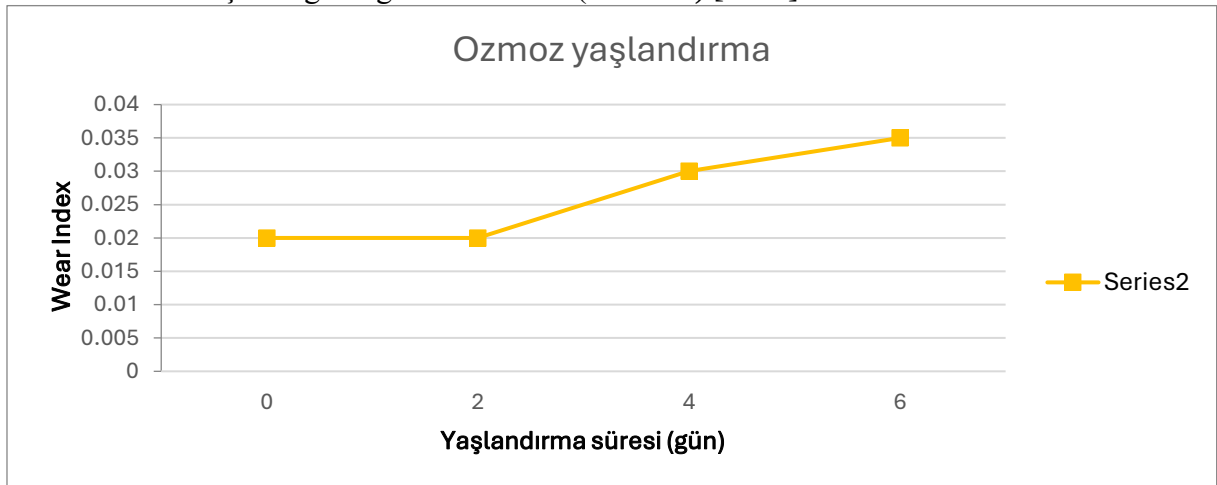
Grafik 1. UV yaşlanma süresinin jelkot kaplı CTP kompozitlerin aşınma indeksi üzerindeki etkisi

3.3. Ozmotik Yaşlanmanın Yüzey Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Ozmotik yaşlanma testleri, yüksek sıcaklıkta su ortamına maruz kalan numunelerin yüzey dayanımında belirgin değişiklikler olduğunu ortaya koymuştur. 80 °C su ortamında gerçekleştirilen hızlandırılmış yaşlandırma, su moleküllerinin jelkot ve matris fazına difüzyonunu artırarak malzemenin yapısında fiziksel ve kimyasal değişimlere yol açmıştır.

Polimer esaslı kompozitlerde su difüzyonu, plastikleşme etkisiyle cam geçiş sıcaklığının düşmesine ve mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olabilmektedir [7,8]. Ayrıca nem, lif-matris ara yüzeyinde aderans kaybına yol açarak yüzey bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir [7]. Özellikle denizel veya nemli ortamlarda kompozit dayanımının zamanla azalacağı literatürde rapor edilmiştir [10].

DeneySEL sonuçlara göre, ozmotik yaşlandırmaya maruz kalan numunelerde aşınma indeksi artmış ve jelkot tabakasındaki plastikleşme ile mikro yapısal zayıflamalar aşınma direncini düşürmüştür. Yaşlandırma süresinin uzaması, yüzey performansındaki bozulmanın giderek belirginleşmesine neden olmuştur. Bu, su difüzyonunun kademeli ve ilerleyici bir hasar mekanizması oluşturduğunu göstermektedir (Grafik 2) [7–10].



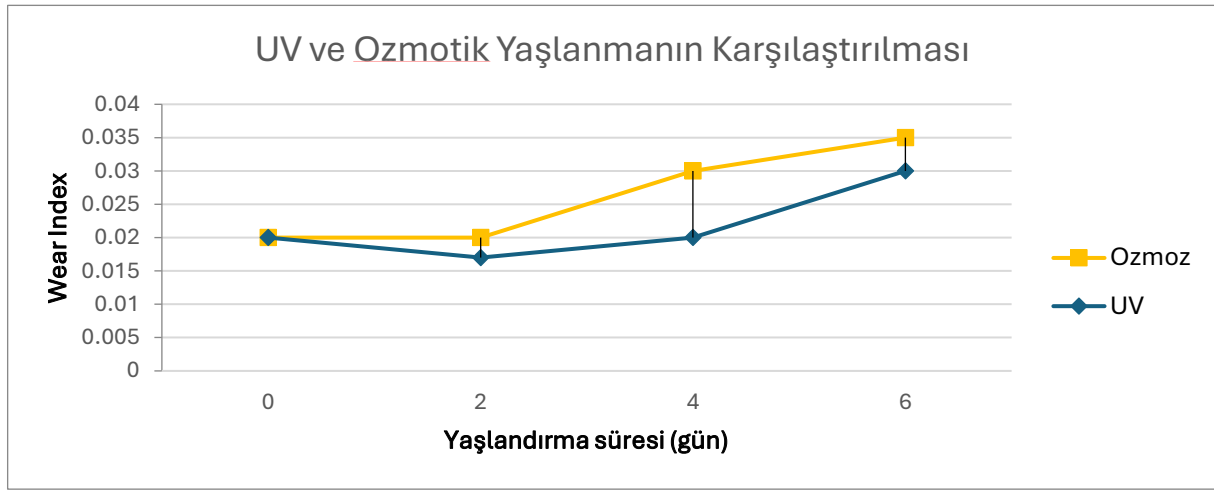
Grafik 2. Ozmotik yaşlanma süresinin jelkot kaplı CTP kompozitlerin aşınma indeksi üzerindeki etkisi

3.4. UV ve Ozmotik Yaşlanmanın Karşılaştırılması

Taber aşınma testi sonuçları UV ve ozmotik yaşlanmanın her ikisinin de jelkot kaplı CTP kompozitlerin yüzey dayanımını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Ancak bozunma mekanizmaları ve etkileri farklıdır.

UV yaşlanma, daha çok yüzey kaynaklı kimyasal bozunmalara neden olur; foto-oksidatif reaksiyonlar, zincir kırılmaları ve mikro çatlaklar yüzey bütünlüğünü bozarak aşınma direncini azaltır [7–9]. Ozmotik yaşlanma ise su difüzyonu ve yüksek sıcaklığın etkisiyle hacimsel değişimler, plastikleşme ve lif-matris ara yüzeyinde zayıflamalar oluşturur [7,8,10].

Deneyisel veriler, bazı koşullarda ozmotik yaşlanmanın UV yaşlanmaya kıyasla daha yüksek aşınma indeksi değerlerine yol açabildiğini göstermektedir. Bu karşılaştırma, jelkot kaplı CTP kompozitlerin servis koşullarında farklı çevresel etkiler altında yüzey



performansının ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Grafik 3).

Grafik 3. UV ve ozmotik yaşlanma koşullarının jelkot kaplı CTP kompozitlerin aşınma indeksi üzerindeki karşılaştırmalı etkisi

3.5. Bulguların Literatür ile Karşılaştırılması

Elde edilen bulgular, jelkot kaplamalı CTP kompozitlerin çevresel koşullara karşı duyarlılığını ve yüzey performansındaki değişim mekanizmalarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. UV ışınımı, jelkot tabakasında foto-oksidatif bozunma ve mikro çatlak oluşumuna yol açarak yüzey sertliğini ve aşınma direncini azaltmaktadır [7–9]. Buna karşılık, ozmotik yaşlanma süreci su moleküllerinin matris içerisine difüzyonu ve sıcaklığın etkisiyle plastikleşme, şişme ve lif-matris ara yüzeyinde zayıflama gibi hacimsel etkiler oluşturmaktadır [7,8,10].

Taber aşınma testi verilerinde gözlenen artışlar, her iki yaşlanma türünün de jelkot tabakasının koruyucu işlevini zamanla azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte, bozunma mekanizmaları farklıdır: UV bozunması esas olarak yüzey tabakasında kimyasal değişimlerle ilerlerken, ozmotik yaşlanma hem yüzeyde hem de kompozitin iç yapısında mekanik ve yapısal zayıflamalara yol açmaktadır [10–12].

Bu sonuçlar, literatürde bildirilen bulgularla büyük ölçüde uyumludur. Önceki çalışmalar, UV ve nem etkilerinin kompozit yüzeylerinde aşınma direncini azalttığını ve jelkot tabakasının uzun süreli performansının çevresel koşullara bağlı olarak değişebileceğini rapor etmektedir [7–12]. Dolayısıyla, jelkot kaplamalı CTP kompozitlerin servis ömrü ve yüzey dayanımı, maruz kalacakları çevresel koşulların türüne ve süresine bağlı olarak öngörülmalıdır.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, jelkot kaplı cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozitlerin UV ve ozmotik yaşlanma koşulları altındaki yüzey dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Yüzey dayanımındaki değişimler, ASTM D4060 standardına uygun olarak gerçekleştirilen Taber aşınma testi verileri temel alınarak değerlendirilmiştir [1].

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Referans numuneler: Yaşlandırma uygulanmamış numuneler, düşük aşınma indeksi değerleri sergilemiş ve jelkot tabakasının CTP kompozit yüzeylerde etkili bir koruyucu bariyer oluşturduğunu göstermiştir [4,5].
- UV yaşlanma etkisi: UV ışınımına maruz bırakılan numunelerde yüzey dayanımında belirgin azalma gözlenmiştir. UV maruziyeti arttıkça aşınma indeksi değerlerinde artış meydana gelmiş ve jelkot tabakasında yüzey kaynaklı kimyasal bozunmanın etkili olduğu tespit edilmiştir [7–9].
- Ozmotik yaşlanma etkisi: 80 °C sıcaklıkta su ortamında gerçekleştirilen ozmotik yaşlanma deneyleri sonucunda, numunelerin yüzey dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Su difüzyonu ve sıcaklık etkisi jelkot tabakasında plastikleşme ve hacimsel değişimlere yol açmış, bu durum aşınma direncini olumsuz etkilemiştir [7,8,10].
- UV ve ozmotik yaşlanmanın karşılaştırılması: Her iki yaşlandırma türü de jelkot kaplı CTP kompozitlerin yüzey aşınma direncini azaltmıştır. Ancak bozunma mekanizmaları farklıdır; UV bozunması daha çok yüzey kaynaklı kimyasal değişimlerle, ozmotik yaşlanma ise hacimsel ve fiziksel değişimlerle yüzey performansını etkilemiştir [7–10].
- Servis performansı: 10.000 devir boyunca yapılan Taber aşınma testleri, çevresel yaşlanma koşullarının jelkot kaplı CTP kompozitlerin yüzey performansını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Bu bulgular, malzemenin servis ömrü ve uygulama güvenliği açısından dikkate alınması gereken önemli bilgiler sunmaktadır [1,7–10].

Sonuç olarak, jelkot kaplamalı CTP kompozitler, çevresel koşullar altında zamanla yüzey dayanımlarında kayıplar yaşamaktadır. UV ve ozmotik etkilerin farklı mekanizmalarla yüzey performansını bozması, bu tür malzemelerin uzun süreli kullanımında maruz kalacakları çevresel koşulların ayrı ayrı değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] ASTM D4060–10, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010.

[2] Mallick, P. K., Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, CRC Press, Boca Raton, 2007.

- [3] Strong, A. B., Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, Society of Manufacturing Engineers (SME), 2008.
- [4] Jones, F. R., Handbook of Polymer-Fibre Composites, Longman Scientific & Technical, Harlow, 1994.
- [5] Akay, M., Mechanical Behaviour of Composite Materials, Springer, London, 2018.
- [6] Carlsson, L. A., Adams, D. F. ve Pipes, R. B., Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [7] Ray, B. C., Effects of Environmental Exposure on Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 23, 7, 671–684, 2004.
- [8] Chin, J. W., Nguyen, T. ve Aouadi, K., Effects of Environmental Exposure on Fiber-Reinforced Polymer Composites, Journal of Composite Materials, 33, 2, 100–120, 1999.
- [9] Nguyen, T., Byrd, E. ve Bentley, J., Effect of UV Radiation on the Mechanical Properties of Polyester-Based Composites, Polymer Degradation and Stability, 77, 1–16, 2002.
- [10] Davies, P., Durability of Composites in a Marine Environment, Composites Science and Technology, 65, 1427–1439, 2005.
- [11] Funke, W., Weathering of Coatings, Progress in Organic Coatings, 31, 5–9, 1997.
- [12] Karbhari, V. M., Chin, J. W., Hunston, D. ve Benmokrane, B., Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure, Journal of Composites for Construction, 7, 3, 238–247, 2003.
- [13] Mouritz, A. P. ve Gibson, A. G., Fire Properties of Polymer Composite Materials, Springer, Dordrecht, 2006.
- [14] Pickering, K. L., Efendy, M. G. A. ve Le, T. M., A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites and Their Mechanical Performance, Composites Part A, 83, 98–112, 2016.

MOBİLYA SEKTÖRÜNDE KAPASİTE PLANLAMA VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ANALİZİ: ANKARA ÖRNEĞİ

Dr. Ramazan BÜLBÜL

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, Ankara,
Turkey

ramazanbulbul@gazi.edu.tr - **ORCID ID:** 0000-0003-4760-9166

Mustafa ALBAYRAK

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering,
Ankara, Turkey

Albayrak.mustfa@gmail.com - **ORCID ID:** 0009-0002-0761-4956

ÖZET

Mobilya sektörü; emek yoğunluğu, yüksek ürün çeşitliliği ve siparişe dayalı üretim dinamikleri nedeniyle kapasite planlamasının en karmaşık olduğu endüstri kollarından biridir. Türkiye ekonomisinde üretim ve istihdam açısından stratejik bir öneme sahip olan bu sektörde, kaynakların etkin kullanımı ve verimlilik artışı, doğru kurgulanmış kapasite planlama stratejilerine bağlıdır. Bu çalışmanın amacı; Türkiye’de faaliyet gösteren mobilya üretim işletmelerinin mevcut kapasite planlama yöntemlerini incelemek, süreçte karşılaşılan temel darboğazları tespit etmek ve sektörün dijital dönüşüm ihtiyaçlarını analiz etmektir. Araştırmada nicel araştırma yöntemi benimsenmiş ve Türkiye genelinde, ağırlıklı olarak Ankara bölgesinde faaliyet gösteren 38 mobilya üretim işletmesine yönelik yapılandırılmış bir anket çalışması uygulanmıştır. Elde edilen veriler; TOBB kapasite kriterleri ve literatürdeki modern planlama yaklaşımları çerçevesinde değerlendirilmiştir. Araştırma bulgularına göre; işletmelerin %68,4’ünün kapasite planlamasında halen manuel hesaplamaları (Excel vb.) birincil araç olarak kullandığı, %44,7’sinin ise ERP/MRP sistemlerine geçiş sürecinde olduğu görülmüştür. Sektörde kapasite kullanımını sınırlandıran temel faktörler; nitelikli personel eksikliği, talep tahminlerindeki sapmalar ve makine parkurundaki plansız duruşlar olarak belirlenmiştir. Ayrıca işletmelerin finansal kısıtlar ve teknik bilgi yetersizliği nedeniyle veri odaklı karar destek sistemlerine geçişte zorlandıkları, buna karşın simülasyon ve optimizasyon araçlarına yönelik yüksek bir talep (%52) duydukları saptanmıştır. Sonuç olarak, Türkiye mobilya sektöründe kapasite planlamasının büyük ölçüde geleneksel yöntemlerle sürdürüldüğü ve bu durumun esnek üretim kabiliyetini kısıtladığı tespit edilmiştir. Çalışma, sürdürülebilir verimlilik için "tahminleme-planlama-üretim" döngüsünün dijitalleşmesi gerektiğini vurgulamakta; üniversite-sanayi iş birliği ve nitelikli iş gücü yetiştirilmesine yönelik stratejik öneriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mobilya Sektörü, Kapasite Planlama, Dijital Dönüşüm, ERP, Üretim Verimliliği.

CAPACITY PLANNING AND DIGITAL TRANSFORMATION ANALYSIS IN THE FURNITURE INDUSTRY: THE ANKARA EXAMPLE

ABSTRACT

The furniture industry is one of the most complex sectors in terms of capacity planning due to its labor-intensive nature, high product variety, and order-based production dynamics. This sector, which holds strategic importance in the Turkish economy in terms of production and employment, relies on well-designed capacity planning strategies for efficient resource utilization and increased productivity. The aim of this study is to examine the current capacity planning methods of furniture manufacturing companies operating in Turkey, identify the main bottlenecks encountered in the process, and analyze the digital transformation needs of the sector. A quantitative research method was adopted, and a structured survey was conducted among 38 furniture manufacturing companies operating throughout Turkey, primarily in the Ankara region. The data obtained were evaluated within the framework of TOBB capacity criteria and modern planning approaches in the literature. According to the research findings, 68.4% of the companies still use manual calculations (Excel, etc.) as their primary tool in capacity planning, while 44.7% are in the process of transitioning to ERP/MRP systems. The main factors limiting capacity utilization in the sector were identified as a shortage of qualified personnel, deviations in demand forecasts, and unplanned downtime in the machinery park. Furthermore, it was found that businesses struggle to transition to data-driven decision support systems due to financial constraints and insufficient technical knowledge, while showing a high demand (52%) for simulation and optimization tools. Consequently, it was determined that capacity planning in the Turkish furniture sector is largely carried out using traditional methods, and this restricts flexible production capabilities. The study emphasizes the need for the digitalization of the "forecasting-planning-production" cycle for sustainable productivity; and offers strategic recommendations for university-industry collaboration and the training of a qualified workforce.

Keywords: Furniture Industry, Capacity Planning, Digital Transformation, ERP, Production Efficiency.

1.GİRİŞ

Mobilya sektörü; ürün çeşitliliğinin fazla olması, müşteri taleplerindeki değişkenlik, sipariş özel üretimin yaygınlığı ve mevsimsel dalgalanmalar gibi kendine has dinamiklere sahiptir. Bu durum, kapasite planlamasını daha karmaşık ve kritik bir hale getirmektedir. İşletmelerin bu değişken yapıya uyum sağlayabilmeleri ve rekabet gücü kazanabilmeleri için üretim

kapasitelerini doğru şekilde belirlemeleri ve mevcut kapasitelerini verimli kullanmaları büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, mobilya sektöründe faaliyet gösteren işletmeler için kapasite konusunun önemi ele alınarak; kapasitenin temel özellikleri ve kapasite türleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kapasite planlaması, kapasite ayarlamaları, karar sürecinde etkili olan parametreler ve kullanılan teknikler değerlendirilmiştir. Özellikle mobilya sektörüne özgü yapının kapasite performansı üzerindeki problemlere odaklanılmıştır. Literatürde yer alan farklı ölçüm teknikleri incelenecek; ayrıca sektör temsilcilerine yönelik yürütülen anket çalışmasının sonuçları değerlendirilerek sektörün kapasiteye ilişkin mevcut durumu ve sorunları ortaya konulmuştur.

Çalışmanın kapsamını Ankara’da faaliyet gösteren çeşitli büyüklüklerdeki mobilya işletmeleri oluşturmaktadır. Araştırma sorularını yanıtlamak amacıyla anket yöntemine dayalı nicel bir veri toplama ve analiz süreci yürütülmüştür. Çalışmanın yalnızca Ankara ile sınırlı tutulması, firmaların iç verilerine erişimin katılımcıların beyanlarıyla kısıtlı kalması ve sektördeki hızlı teknolojik dönüşümün getirdiği zaman duyarlılığı, araştırmanın temel sınırlılıkları olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Ankara’da mobilya sektöründe faaliyet gösteren üretim işletmelerinin kapasite planlama süreçlerinde karşılaştıkları problemleri belirlemek, nedenlerini analiz etmek ve sektörel gelişime katkı sağlayacak çözüm önerileri sunmaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

İşletme biliminde kapasite, en genel tanımıyla bir sistemin belirli bir zaman diliminde mal veya hizmet üretebilme yeteneği ve elde edebileceği en yüksek çıktı miktarı olarak ifade edilmektedir. Günümüz rekabet koşullarında bu kavram salt fiziki üretimden ziyade, mevcut girdilerle birim maliyetlerin minimum kılındığı "ekonomik kapasite" odağında değerlendirilmektedir (Torunoğlu F., 2006). Bu bağlamda kapasite planlaması; şirketlerin gelecekteki pazar talebini karşılamak için ihtiyaç duydukları kaynak miktarını belirleyerek, kaynakların mevcudiyeti ile müşteri talepleri arasında optimum dengeyi kurma sürecidir (Yagüe, 2025; Bulut, 2004; Uludağ, 2025). Etkili bir planlama stratejisi, işletmelerin atıl veya eksik kapasite sorunlarıyla karşılaşmasını engelleyerek kaynak israfını önler, operasyonel verimliliği maksimize eder ve genel karlılığa doğrudan katkı sağlar (Bulut E., 2004). İşletmelerin büyüme hedefleri doğrultusunda kısa, orta ve uzun vadeli olarak yürütülen kapasite planlama kararları; pazar talebindeki dalgalanmalar, hammadde tedariki, teknolojik altyapı ve finansal kısıtlar gibi çok çeşitli faktörlerin baskısı altındadır (Torunoğlu F., 2006; Toker B., 1985). Talebin değişken, ürün yapısının ise karmaşık olduğu üretim ortamlarında geleneksel deneme-yanılma yöntemleri yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle modern üretim yönetiminde, üretim kaynakları planlaması (MRP II), kapasite ihtiyaç planlaması (CRP) ve simülasyon gibi ileri analitik tekniklerin kullanımı ön plana çıkmaktadır (Uludağ S., 2025). Sonuç olarak kapasite planlaması, aşırı maliyetlere katlanmadan pazar talebine yanıt verebilmeyi sağlayan ve işletmelerin rekabet avantajı elde etmesinde stratejik rol oynayan kritik bir karar mekanizmasıdır (Toker B., 1985).

Mobilya sektörü, küresel ekonominin desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır ve 2026 yılına kadar yıllık %8,2'lik istikrarlı bir büyüme oranı yaşaması ve sonunda 940 milyar dolarlık bir değere ulaşması öngörülmektedir. Türkiye, 2022 yılı itibarıyla dünya mobilya üretiminde ve ihracatında 11. sırada yer almaktadır ve dünya mobilya ihracatının %1,7'sini gerçekleştirmektedir. Sektör, geçmişte atölye benzeri küçük işletmelerin hakimiyetindeyken, teknolojik gelişmeler ve nitelikli eleman sayısındaki artışla birlikte fabrikasyon tarzı işletmelere doğru bir evrim geçirmiştir. Türkiye'deki mobilya endüstrisi, orman ürünlerinin bol olduğu veya pazar talebinin yüksek olduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Üretim açısından kilit bölgeler İstanbul, Ankara, Bursa (İnegöl), Kayseri, İzmir ve Adana'dır. Türkiye mobilya sektörü hem yurt içinde hem de yurt dışında büyüme kaydetmektedir ve dış ticaretteki başarısı ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda önemli bir istihdam kaynağıdır (Özkan, 2006).

Avrupa Birliği ülkeleri dünya mobilya ihracatında büyük ölçüde söz sahibidir ve birçok AB ülkesinde mobilya imalatı temel bir endüstridir (ASO, 2017).

Mobilya sektörü Türkiye'nin en eski sektörlerinden biridir ve önceleri düşük teknolojiye ve emek yoğun üretim yapısına sahipken günümüzde daha fazla bilgi ve sermaye yoğun bir sektör olma yolunda ilerlemektedir. Sektör, üretim ve istihdam ile ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır ve ihracatıyla Türkiye, dünya mobilya ihracatında önemli ihracatçı ülkeler arasında yer almaktadır. Ancak, Türkiye'nin mobilya sektöründeki ihracat rakamları mevcut üretim potansiyelinin altında kalmaktadır. Hammadde tedarikinde yaşanan sorunlar da mobilya sektörünü olumsuz etkilemektedir. Yeterli miktarda ve kalitede hammaddenin uygun fiyatla tedarigi sağlanmalıdır (Sütçü O.K., 2005). Ağaç işleri makinelerinde miktar ve kalite olarak artışlar olmasına rağmen, teknolojiye hızlı gelişme bu sanayi kolunda hızlı adaptasyonu sağlamada engel oluşturmuştur ve mobilya endüstrisi hassas işleme kabiliyeti olan bilgisayar kontrollü makine kullanımının yaygınlaşmasına ihtiyaç duymaktadır (İnal 2006). Emek yoğun bir sektör olması nedeniyle sektördeki SGK ve diğer yüklerin hafifletilmesi sektöre rekabet gücü kazandıracaktır. Mobilya sektörünün kapasite kullanım oranı da rekabet gücü yüksek olan ülkelerin oranlarından daha düşüktür ve bu durum önemli bir zorluk teşkil etmektedir (Demirci, 2005).

Genel üretim işletmelerinde kapasite planlama, yeterli üretim veya iş kapasitesi ile doğru zamanda doğru miktarı sağlayabilmeyi amaçlar. Ancak, üretim işletmelerini değişikliklerle karşı karşıya getiren tahmin hataları, ürün ağaçlarının yenilenmesi, fire oranının artması, tedarikçilerin geç kalması gibi etmenler kapasite planlamasında sorunlara yol açabilmektedir. Bu durum, çok aşırı yeniden çizelgeleme ve dinamik teslim süreleri gibi problemleri beraberinde getirebilir (Altınok H., 2005).

Mobilya sektöründe yatak üretimi yapan bir işletmede iş gören verimliliğinin düşmesine yol açan iş zaman kayıplarının belirlenmesi ve simülasyon yöntemi ile kapasite artırımı üzerine yapılan bir çalışmada, düşük verimlilik ve üretim planlama zorluğu gibi sorunlara dikkat çekilmiştir (Ekşi A., 2001). Türkiye mobilya sektöründe genel olarak düşük kapasite kullanım oranları önemli bir problem olarak tespit edilmiştir ve bu durumun nedenleri arasında hammadde yetersizliği, teknik bilgi eksikliği, sermaye yetersizliği ve üretim sırasında karşılaşılan sıkıntılar sayılmaktadır. Panel mobilya üretiminde üretim planlama eksikliklerinden kaynaklanan sorunların tespiti ve çözüm önerileri üzerine anket çalışmaları yapılmıştır (Sütçü

A., 2005). Ayrıca, mobilya sektörünün tedarik zincirinde tedarikçilerin kapasite problemleri de işletmeler tarafından dile getirilmektedir (Güler M., 2019).

3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, Türkiye mobilya sektöründe faaliyet gösteren üretim işletmelerinin kapasite planlama süreçlerindeki durumunu, karşılaştıkları zorlukları ve teknolojik ihtiyaçlarını belirlemek amacıyla nicel araştırma yöntemlerinden anket tekniği kullanılmıştır. Kesitsel araştırma tasarımının benimsendiği çalışmada, veriler tek bir zaman diliminde toplanarak sektörel eğilimlerin betimsel ve çıkarımsal analizinin yapılması hedeflenmiştir.

Veri toplama aracı olarak, araştırmacı tarafından sektörel dinamikler (siparişe dayalı üretim, ürün çeşitliliği, mevsimsellik vb.) göz önüne alınarak özgün bir anket formu geliştirilmiştir. Toplam 19 sorudan oluşan çevrimiçi anket (Google Forms), işletmelerin kurumsal özelliklerini, kapasite planlama pratiklerini, kullandıkları veri kaynaklarını ve gelişim alanlarını ölçmeyi amaçlamıştır. Soruların anlaşılabilirliğini test etmek için öncelikle bir pilot uygulama yapılmış ve elde edilen geri bildirimler doğrultusunda gerekli sadeleştirmeler yapılarak asıl veri toplama aşamasına geçilmiştir.

Tamamen gönüllülük esasına dayalı olarak sosyal medya ve sektörel iletişim kanalları üzerinden dağıtılan ankete toplam 50 yanıt gelmiştir. Ancak araştırmanın kapsamı ve geçerliliği gereği, yalnızca çalışmanın temel odak noktasıyla doğrudan ilgili olan 38 farklı mobilya işletmesinin verisi dâhil edilmiştir. Bu örneklem büyüklüğü, hedeflenen sektördeki kalıpları ve kapasite verimsizliklerinin nedenlerini istatistiksel olarak ortaya koymak için temel kabul edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Katılımcı işletmelerin demografik profili araştırmaya katılan 38 mobilya ve ahşap sanayi işletmesinin büyük bir bölümü sektörel kümelenmenin yoğun olduğu Ankara'da faaliyet göstermektedir. İşletmelerin çalışan sayıları incelendiğinde, KOBİ ölçeğindeki firmaların ağırlıkta olduğu, ancak büyük bir kısmının 20 yıldan uzun süredir sektörde yer alan, finansal açıdan sağlam (yıllık 10 milyon TL üzeri ciroya sahip) ve olgunlaşmış yapılar olduğu

görülmektedir. Bu profil, elde edilen bulguların sektörde yerleşik, ancak geleneksel yöntemlere bağlı kalma eğilimi taşıyabilen KOBİ'lerin gerçekliğini yansıttığını göstermektedir.

Kapasite planlama süreçleri ve kullanılan yöntemler işletmelerde kapasite planlama süreçleri ağırlıklı olarak Üretim Müdürleri, Planlama Departmanları ve Endüstri Mühendisleri gibi teknik kadrolar tarafından yürütülmektedir. Sektörün yüksek ürün çeşitliliği ve siparişe dayalı yapısı nedeniyle planlamalar genellikle "proje bazlı", "aylık" veya "ihtiyaca göre" yapılmaktadır. Kullanılan yöntemler incelendiğinde çok çarpıcı bir çelişki ortaya çıkmaktadır: Katılımcıların finansal olgunluğuna rağmen %68,4'ü kapasite planlamasında hala "manuel hesaplamalara (Excel, defter vb.)" bağımlıdır. ERP/MRP sistemleri (%44,7) ve veri analiz araçlarının kullanımı daha düşük seviyelerdedir. Satış tahminleri ve müşteri siparişleri en çok kullanılan veri kaynakları olsa da bu verilerin manuel süreçlerle entegre edilmesi planlama hatalarına zemin hazırlamaktadır.

Karşılaşılan temel problemler ve performansa etkisi işletmelerin kapasite planlamasında karşılaştıkları en temel darboğazlar sırasıyla; "personel eksikliği/nitelik sorunları", "makine arızaları/bakım problemleri", "mevsimsel dalgalanmalar" ve "talep tahminindeki hatalar" olarak belirlenmiştir. Bu sorunlar birbirini tetikleyen bir yapıdadır; örneğin, talep tahmin hataları doğrudan atıl kapasiteye veya karşılanamayan siparişlere yol açmaktadır. Katılımcıların büyük bir kısmı, bu planlama sorunlarının işletme performansını "orta" veya "çok" düzeyde etkilediğini belirtmiştir. İşletmeler kronikleşmiş verimsizliklere alışıp bunlarla başa çıkma mekanizmaları geliştirmiş olsalar da, yaşanan teknik ve teknolojik zorluklar uzun vadeli rekabet gücünü aşındırmaktadır. Dış etkenler (ekonomik dalgalanmalar, tedarik zinciri aksaklıkları) firmalar tarafından genellikle kontrol edilemeyen "veriler" olarak kabul edilse de stratejik planlamayı doğrudan sekteye uğratmaktadır.

Dijital dönüşüm ihtiyacı ve gelişim alanları elde edilen bulgular, mobilya sektöründe ciddi bir dijital dönüşüm farkındalığı olduğunu kanıtlamaktadır. İşletmeler, kapasite planlama süreçlerinin genel başarıya olan "büyük katkısının" farkındadır. Bu doğrultuda en çok iyileştirme yapılmak istenen alanların başında "Eğitim ve personel gelişimi" ile "Yazılım ve teknoloji kullanımı" gelmektedir. Manuel süreçlerin yetersizliğini kabul eden işletmeler, rekabetçi kalabilmek adına gelecekte en çok "Veriye dayalı karar destek sistemleri", "Simülasyon ve optimizasyon araçları" ve "Yeni nesil ERP/MRP yazılımları" kullanmayı hedeflemektedir. Bu durum, sektörde ileri teknoloji yatırımlarına ve bu teknolojileri yönetecek insan kaynağına yönelik acil bir ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma mobilya sektöründeki üretim işletmelerinin kapasite planlaması süreçlerine ilişkin önemli bulguları ortaya koymuştur. Çalışma, sektörün demografik ve kurumsal yapısına, mevcut kapasite planlama uygulamalarına, karşılaşılan zorluklara ve gelecekteki gelişim alanlarına yönelik ihtiyaçlara dair kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır.

İşletmelerin büyük bir kısmı kapasite planlamasında hala "manuel hesaplamalar" ve Excel gibi temel araçlara güvenmektedir. Ancak, aynı zamanda "veri odaklı karar destek sistemleri", "simülasyon ve optimizasyon araçları" ve "yeni ERP/MRP yazılımları" gibi daha gelişmiş yöntem ve araçlara yönelik güçlü bir arzu bulunmaktadır. Bu durum, sektörde dijital dönüşüme yönelik bir isteklilik olduğunu, ancak mevcut teknolojik altyapı ve yetenekler arasında bir boşluk bulunduğunu göstermektedir.

Mobilya sektörü işletmeleri, kapasite planlamasında "personel eksikliği veya nitelik sorunları", "talep tahminindeki hatalar", "makine arızaları" ve "tedarik zinciri aksaklıkları" gibi çok çeşitli ve birbiriyle ilişkili sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu sorunlar, işletme performansını genellikle "orta düzeyde" etkilemekle birlikte, kronikleşmiş etkileri uzun vadede önemli verimlilik kayıplarına yol açabilmektedir. Özellikle, dış etkenlerin (ekonomik koşullar, mevsimsel dalgalanmalar) etkisi, şirketlerin bu zorlukları içselleştirmesi nedeniyle bazen hafife alınabilmektedir.

İşletmeler, kapasite planlama süreçlerinde en çok "eğitim ve personel gelişimi" ile "yazılım ve teknoloji kullanımı" konularında iyileşme ihtiyacı duymaktadır. Bu durum, insan sermayesinin geliştirilmesi ve modern teknolojik araçların benimsenmesinin, sektördeki kapasite planlama sorunlarının üstesinden gelmek için kritik öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Genel olarak, katılımcı işletmelerin büyük çoğunluğu (%86,8'i) kapasite planlamasının işletme başarısına "büyük" veya "orta düzeyde" katkı sağladığını belirtmiştir. Bu yüksek algı, sektörün kapasite yönetiminin stratejik önemini kavradığını ve bu alandaki yatırımlara açık olduğunu göstermektedir.

Sektördeki KOBİ'lerin yoğunluğunun göz önüne alınması, kapasite planlama yazılımları ve eğitimleri için maliyet etkin ve ölçeklenebilir çözümler geliştirilmelidir. KOSGEB gibi kurumlar aracılığıyla, küçük seçenekler bütçelerine uygun, kullanımı kolay ERP/MRP sistemlerine erişimleri kolaylaştırılabilir ve bu sistemlerin devredilmesi için danışmanlık hizmetleri sunulmalıdır.

"Personel eksikliği veya nitelik sorunları"nın en önemli problem olması nedeniyle Ağaç İşleri

Endüstri Mühendisliği bölümleri, meslek liseleri ve üniversiteler arasında iş birliği artırılmalıdır. Sektörün yönüne yönelik güncel kapasite planlama teknikleri, veri analizi ve yazılım kullanımı eğitimleri düzenlenmeli, mevcut devre dışı kalma durumunun sürekli geliştirilmesi desteklenmelidir.

İşletmelerin "talep tahminlerindeki hatalar" ve "veri toplama ve analizlerdeki ayrıntılardaki eksiklikler"i gidermek için, veri toplama altyapılarını desteklemeleri ve analitik destekleri artırmaları gerekmektedir. Bu bağlamda, "veri odaklı karar destek sistemleri"nin benimsenmesi teşvik edilir, bu sistemlerin teslimatı öngörüselle analizlerle daha doğru talep tahminleri yapılması hedeflenmelidir.

Mobilya sektörünün yüksek ürün çeşitliliği ve kişiselleştirme talebinin göz önüne alınması, "simülasyon ve parçalama araçları"nın kullanımı, farklı üretim senaryolarını test etmek ve darboğazları belirleyerek kapasiteyi en verimli şekilde kullanmak için büyük potansiyel sunmaktadır. Bu tür araçların tanıtımı ve kullanımı için pilot projeler ve başarı hikayeleri oluşturulabilir.

6. KAYNAKÇA

1. Altınok, H. (2005). Üretim işletmelerinde kapasite planlama ve çizelgeleme problemleri üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
2. Ankara Sanayi Odası (ASO). (2017). Mobilya Sektörü Raporu. Ankara: Ankara Sanayi Odası Yayınları.
3. Bulut, E. (2004). Mobilya sektöründe talep tahmini ve kapasite planlaması ilişkisi: Bir model önerisi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
4. Demirci, S. (2005). Türkiye mobilya sektörünün yapısal analizi ve rekabet gücü. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
5. Ekşi, A. (2001). Mobilya sektöründe üretim sistemlerinin simülasyon yöntemi ile analizi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
6. Güler, M. (2019). Mobilya sektöründe tedarik zinciri yönetimi ve kapasite sorunları üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa.
7. İnal, S. (2006). Mobilya endüstrisinde üretim teknolojileri ve makine kullanımının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
8. Özkan, İ. (2006). Türkiye mobilya sektörünün yapısal analizi ve uluslararası rekabet gücü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
9. Sütçü, A. (2005). Panel mobilya üretiminde üretim planlama sorunları ve çözüm önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
10. Sütçü, O. K. (2005). Türkiye mobilya sektöründe hammadde tedarik sorunları ve çözüm önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
11. Toker, B. (1985). Üretim yönetimi ve kapasite planlaması. İstanbul: İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Yayınları.

12. Torunoğlu, F., (2006). Kapasite Planlaması ve Mobilya Üretim Sistemlerinde Kapasite Üzerinde Etkili Faktörlerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.
13. Yagüe, A. (2025). Capacity planning and resource optimization in manufacturing systems. Journal of Production Management, 18(2), 115-128.
14. Uludağ, S. (2025). *Kapasite planlaması ve yönetimi*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Erişim adresi:
<https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/serhat.uludag/122286/Kapasite%20Planlamas%C4%B1%20.pdf> (Erişim Tarihi: 05.03.2026).

ATIK TETRAPAK AMBALAJLAR VE DOĞAL AHŞAP KAPLAMALARIN KOMBINASYONU İLE TUTKALSIZ KOMPOZİT PANEL GELİŞTİRİLMESİ

Dr. Ramazan BÜLBÜL

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering,
Ankara, Turkey

ramazanbulbul@gazi.edu.tr - **ORCID ID:** 0000-0003-4760-9166

Musa Bedirhan SÜRÜCÜ

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering,
Ankara, Turkey

surucubedirhan06@gmail.com - **ORCID ID:** 0009-0009-2711-7659

Murat CAN

Mahmudiye neighbourhood Karaagac Street 27. Mobilya Street No:41,(TigerWood) Bursa,
Turkey

info@tigerwood.com.tr - **ORCID ID:** 0009-0006-7315-5179

ÖZET

Günümüzde hızla artan dünya nüfusu, katı atık miktarında ciddi bir artışa neden olmakta ve sürdürülebilir bir gelecek için geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Kağıt, polietilen ve alüminyumdan oluşan çok katmanlı aseptik ambalajlar (TetraPak), geri kazanımı kritik olan atık grupları arasında yer almaktadır. Araştırmalara göre bu yöntemlerden birisi de panel üretimidir. Bu çalışmada, tek kullanımlık TetraPak atıkları ile estetik ve yapısal özelliklere sahip doğal ahşap kaplamaların birleştirilmesiyle; piyasada yaygın olarak kullanılan OSB, MDF ve yonga levha gibi ürünlere alternatif, çevre dostu bir kompozit panel geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında yerli meşe, yerli ceviz ve sarıçam olmak üzere üç farklı ağaç türünden elde edilen kaplamalar kullanılmış ve paneller presleme yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozit panellerin fiziksel performanslarını belirlemek amacıyla; rutubet miktarı, tam kuru yoğunluk, hava kurusu yoğunluk ve su alma/şişme testleri gerçekleştirilmiştir. Şişme testi sonuçlarına göre ortalama değerler; meşe kaplamalı kompozit panelde (MKKP) %6.76, ceviz kaplamalı panelde (CKKP) %7.40 ve sarıçam kaplamalı panelde (SKKP) %6.92 olarak kaydedilmiştir. Fiziksel analizlerde ortalama rutubet değerleri sırasıyla %1.44 (MKKP), %1.70 (CKKP) ve %1.99 (SKKP) olarak ölçülürken; tam kuru yoğunluk değerleri 0.873-0.896 g/cm³; hava kurusu yoğunluk değerleri ise 0.903-0.930 g/cm³ aralığında saptanmıştır. Çalışmanın en önemli çıktısı, TetraPak yapısında bulunan polietilenin presleme esnasında ahşap malzeme ile kuvvetli bir bağ oluşturmasıdır. Bu termoplastik etkileşim, ilave bir tutkal kullanımına gerek kalmadan tutunma sağlayarak üretim maliyetlerini düşürmüş ve malzemenin sürdürülebilirlik değerini artırmıştır. Elde edilen bulgular, atık TetraPak ambalajların doğal ahşap kaplamalarla birlikte endüstriyel panel üretiminde çevre dostu bir alternatif olarak kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: TetraPak, Geri Dönüşüm, Ahşap-Plastik Kompozit, Tutkalsız Bağlanma, Sürdürülebilirlik

Development of Adhesive-Free Composite Panels Through the Combination of Waste TetraPak Packaging and Natural Wood Veneers

ABSTRACT

Today, the rapidly increasing global population leads to a significant rise in the amount of solid waste, obligating the development of recycling methods for a sustainable future. Multi-layered aseptic packaging (TetraPak), consisting of paper, polyethylene, and aluminum, is among the waste groups whose recovery is critical. According to research, one of these recovery methods is panel production. In this study, by combining single-use TetraPak waste with natural wood veneers possessing aesthetic and structural properties, it was aimed to develop an eco-friendly composite panel as an alternative to widely used commercial products such as OSB, MDF, and particleboard. Within the scope of the study, veneers obtained from three different tree species—native oak, native walnut, and Scots pine—were used, and the panels were manufactured using the pressing method. To determine the physical performance of the produced composite panels; moisture content, oven-dry density, air-dry density, and water absorption/thickness swelling tests were performed. According to the swelling test results, average values were recorded as 6.76% for the Oak-Veneered Composite Panel (OVCP), 7.40% for the Walnut-Veneered Composite Panel (WVCP), and 6.92% for the Scots Pine-Veneered Composite Panel (SPVCP). In physical analyses, average moisture values were measured as 1.44% (OVCP), 1.70% (WVCP), and 1.99% (SPVCP), respectively; while oven-dry density values were determined to be in the range of 0.873-0.896 g/cm³, and air-dry density values in the range of 0.903-0.930 g/cm³. The most significant output of the study is that the polyethylene within the TetraPak structure formed a strong bond with the wood material during pressing. This thermoplastic interaction provided adhesion without the need for additional glue, thereby reducing production costs and increasing the sustainability value of the material. The findings demonstrate that waste TetraPak packaging, together with natural wood veneers, can be used as an eco-friendly alternative in industrial panel production.

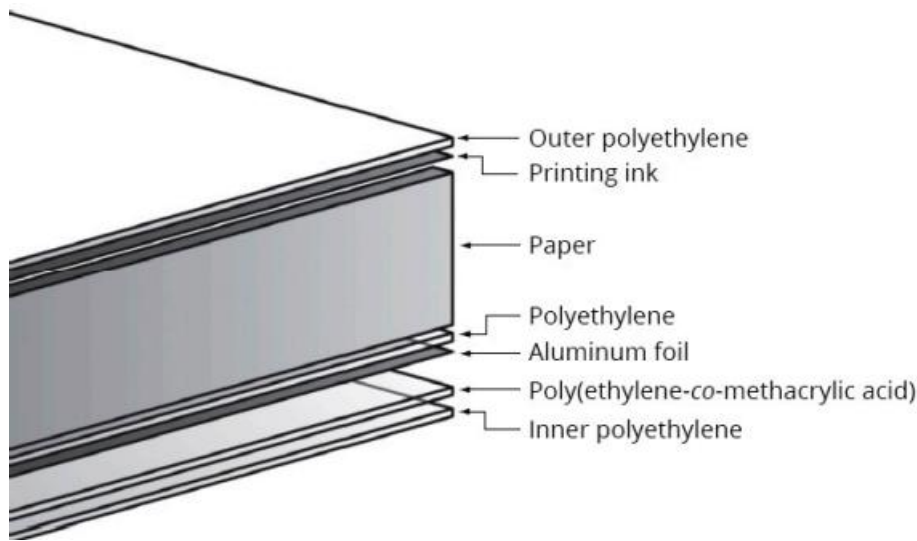
Keywords: Wood-plastic composite, TetraPak, adhesive-free production, recycling, sustainability.

1.GİRİŞ

21. Yüzyılın en büyük çevresel sorunlarından biri, nüfus, kentleşme ve tüketim artışlarıyla orantılı ilerleyiş gösteren katı atık miktarıdır. Bununla birlikte döngüsel ekonomiye katkı sağlamak amacıyla da geri dönüşüme yönelik tüm dünyada sürekli yeni yollar aranmaktadır. Dünyamızdaki sınırlı doğal kaynakların korunması ve çevre kirliliğinin azaltılması için “atık” kavramı “hammadde” olarak ele alınması gereklilik haline gelmiştir (Mısır ve Arıkan, 2022; Bilgili, 2023). Güncel pazar verileri, 2022 yılında dünya çapında yaklaşık 193 milyar TetraPak

ambalaj birimi satışı gerçekleşti 12milyar Avro gelir elde edildi ve 1.2 milyon ton ambalaj geri dönüşümü sağlandı (TetraPak, 2022). Bu devasa pazar payına rağmen, üretilen ambalajların ufak bir kısmı geri dönüşüm akışlarına dahil edilebildiği; geri kalan büyük bir kısmın ise depolama veya yakma yoluyla bertaraf edildiği bildirilmektedir (Recupido, 2023). Türkiye özneline değerlendirildiğinde T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan '2023 Yılı Atık İstatistik Bülteni' verilerine göre ; Atık Beyan Sistemi üzerinden beyanda bulunan 135.976 tesisten alınan veriler doğrultusunda, Türkiye'nin toplam katı atık hacminin 38.181.245 yıl/tona ulaştığı saptanmıştır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Kayıt dışı faktörler ve beyan edilmemiş atık kalemleri de göz önünde bulundurulduğunda, gerçek rakamların bu verilerin üzerinde olduğu öngörülmektedir (Enç vd., 2012).

Gıda sektöründe muhafaza etmede tek kullanımlık aseptik ambalaj Tetra Pak teknolojisinin gelişimi, İsveçli mühendis Ruben Rausing önderliğinde 1943 yılında başlamıştır. Marka adı, kartonların tetrahedral şeklinden esinlenerek 1944 yılında tescil edilen bu ambalajlar, süt ve türevi sıvı gıdaların verimli taşınması ve saklanması sayesinde küresel bir popülerlik kazanmıştır (Rancea, 2025). Gıda sektöründe yaygın olarak kullanılan bu kompozit içecek kartonları; tipik olarak %75 oranında kâğıt (selüloz elyaf), %20 oranında polietilen (PE) ve %5 oranında alüminyum (Al) içeriğine sahiptir (Ayrılmış vd., 2008; Robertson, 2021; Zawadiak vd., 2017). Ambalajın kompleks yapısındaki Al folyo; ışık, oksijen, su buharı ve mikroorganizmalara karşı mükemmel bir bariyer sağlarken; PE katmanları kâğıdı sıvıdan korumakta ve katmanları birbirine bağlayarak ısı yalıtıma olanak tanımaktadır (Zawadiak vd., 2017). Ancak bu bileşenlerin moleküler düzeyde birbirine sıkıca bağlı olması, klasik geri dönüşüm yöntemlerinde ayrıştırma işlemlerini oldukça pahalı ve karmaşık bir süreç haline getirmektedir (Rancea, 2025). Bu nedenle Tetra Pak atıklarının geri kazanımı ve yeniden değerlendirilmesi, sürdürülebilir atık yönetimi açısından önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Baltacı, 2023).



Görsel 1. Aseptik kartonun tipik yapısı (Robertson, 2021)

Tetra Pak atıklarının geri dönüşüm yöntemleri arasında en düşük maliyeti ve en yüksek sürdürülebilirliği sağlayabilecek yöntemlerden biri "yonga levha" üretimidir. Literatürde yapılan çalışmalar, bu atıkların parçalanarak sunta, yonga levha veya polimer kompozit üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Bal, 2022; Bhaskar vd., 2020). Ancak mevcut endüstriyel levha üretim süreçlerinin (MDF, OSB, yonga levha) büyük bir kısmı, insan sağlığına zararlı uçucu organik bileşikler (VOC) ve formaldehit içeren sentetik tutkalların kullanımına dayanmaktadır (Schwarzkopf ve Burnard, 2016). Bu nedenle daha çevreci, düşük emisyonlu ve sürdürülebilir alternatif malzeme üretim yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada; tek kullanımlık Tetra Pak atıkları ile estetik ve yapısal özelliklere sahip doğal ahşap kaplamaların, ambalajın kendi bünyesindeki polietileni bir bağlayıcı olarak kullanan "termoplastik laminasyon" yöntemiyle, ilave bir yapıştırıcı olmaksızın birleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu tutkalsız kompozit paneller; piyasadaki sentetik tutkal içerikli ürünlere çevreci, sağlıklı ve yüksek katma değerli bir alternatif sunmayı amaçlamaktadır.

2.MATERYAL VE METOD

2.1 Materyallerin Tedariki ve Hazırlanması

Araştırmada kullanılan TetraPak atıkları Bursa'da faaliyet gösteren TigerWood firmasından temin edilmiştir. Endüstriyel kırıcılardan geçirilerek belirli boyutlara getirilen atıklar presleme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Panellerin dış yüzey katmanlarını oluşturmak amacıyla Türkiye yerel ormanlarından elde edilen üç farklı ağaç türüne ait papel kaplamalar tercih edilmiştir: Yerli Meşe (*Quercus spp.*), Yerli Ceviz (*Juglans regia*) ve Sarıçam (*Pinus sylvestris*). Kaplamalar 0,6 mm sabit kalınlıkta olup, dikiş yöntemiyle birleştirilerek yüzey bütünlüğü sağlanmıştır.



Görsel 2. Uygulaması yapılmış kaplamalı levhalar

2.2 Üretim Süreci

Tutkalsız ahşap-plastik kompozit (APK) panellerin üretimi "sandviç panel" konseptiyle kurgulanmıştır. Alt ve üst yüzey kaplamalarının arasına, ön işlemden geçirilmiş Tetra Pak yongaları homojen bir şekilde serilmiştir. TetraPak içeriğindeki düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) erime karakteristiği ve ahşap dokusuna nüfuz kabiliyeti dikkate alınarak, pres sıcaklığı 180°C olarak optimize edilmiştir. Üretim; ara sıcak, ana sıcak, ana soğuk ve ara soğuk olmak üzere dört aşamalı bir presleme döngüsüyle gerçekleştirilmiştir. Uygulanan spesifik basınç ve süre parametreleri, eriyen LDPE fazının ahşap lümen boşluklarına nüfuz ederek "mekanik kilitlenme" (mechanical interlocking) yoluyla termoplastik bir etkileşim kurmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Süreçte hiçbir sentetik reçine veya ilave kimyasal bağlayıcı kullanılmamıştır. Üretilen paneller, testler öncesinde Gazi Üniversitesi Ağaçşleri Endüstri Mühendisliği laboratuvarında 20±2°C sıcaklık ve %65±5 bağıl nem koşullarında iklimlendirilerek denge rutubetine getirilmiştir.

2.3 Fiziksel Özellikler

2.3.1. Yoğunluk ve rutubet tayini

Deney örneklerinin yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla TS EN 323 (1999)'te belirtilen esaslara uyulmuştur. Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerine sırası ile Meşe Kaplamalı Kompozit Panel (MKKP), Ceviz Kaplamalı Kompozit Panel (CKKP) ve Sarıçam Kaplamalı Kompozit Panel (SKKP) olarak levhalar üretilmiştir. Üretilen levhalardan 5'er adet 50×50×12

mm ölçülerinde toplam 15 adet örnek hava kurusu yoğunluk, tamkuru yoğunluk ve rutubet değerleri için elde hazırlanmış, daha sonra bu örnekler $\pm 0,01$ g duyarlıklı terazi ile tartılmışlardır.

Böylece örneklerin rutubetli (W : %12 hava kurusu yoğunluğu) ağırlıkları (m_W) tespit edilmiştir. Daha sonra bu örneklerin boyutları $\pm 0,01$ mm duyarlıklı dijital kumpas ile ölçülerek hacimleri (V_W) hesaplanmıştır. %12’lik nem düzeyindeki (ρ_{12}) yoğunlukları eşitlik 1’e göre hesaplanmıştır.

$$\rho_W = \frac{m_W}{a_W \times b_W \times l_W} = \frac{m_W}{V_W} (g/cm^3) \quad [1]$$

Deney örneklerinin Rutubetlerinin belirlenmesi amacıyla TS EN 322 (1999)’de belirtilen esaslarına uyulmuştur. Kurutmadan önce test parçasının başlangıç kütlesi (m_1), g cinsinden ve Deney parçasının fırında kurutulmuş kütlesi (m_2), g cinsindendir. Rutubetin belirlenmesi için;

$$W, \% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad [2]$$

eşitliği kullanılmıştır (eşitlik 2).



Görsel 3. Etüv içerisindeki numuneler

2.3.2 Kalınlığına Şişme ve Su Alma Performansı

Deney örneklerinin suya karşı boyutsal kararlılığının belirlenmesi amacıyla TS EN 317 ‘ de belirtilen esaslara uyulmuştur. Test için her bir varyasyondan üretilen levhalardan 5’er adet $50 \times 50 \times 12$ mm ölçülerinde toplam 15 adet örnek kalınlığına şişme ve su alma değerleri için elde hazırlanmış daha sonra numuneler, test öncesinde $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem koşullarına sahip iklimlendirme odasında sabit ağırlığa ulaşana kadar bekletilmiştir. İklimlendirme sonrası numunelerin orta noktalarından $0,01$ mm hassasiyetli dijital kumpas ile başlangıç kalınlıkları (T_1) ölçülmüştür. Ardından numuneler, pH değeri nötr olan $20 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su banyosuna, birbirlerine ve tank yüzeyine temas etmeyecek şekilde dikey olarak daldırılmıştır. 24 saatlik daldırma süresi sonunda sudan çıkarılan numunelerin yüzeyindeki fazla su alınmış ve aynı ölçüm noktalarından son kalınlık (T_2) değerleri kaydedilmiştir. Kalınlığına şişme oranı (G), eşitlik 3’e göre yüzde (%) cinsinden hesaplanmıştır:

$$G, \% = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \times 100 \quad [3]$$

Deney örneklerinin Su alma (Water Absorption) oranının belirlenmesi amacıyla TS EN 317’ de belirtilen esaslarına uyulmuştur. Önce test parçasının başlangıç kütlesi (M_1), g cinsinden ve sudan çıkarılan numunelerin yüzeyindeki serbest su, kurutma kağıdı (kurutma tamponu) yardımıyla hızlıca uzaklaştırıldıktan sonra son kütle (M_2) g cinsindendir, tartımları yapılmıştır. Panellerin yüzde (%) cinsinden su alma oranları (W_a) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$W_a, \% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad [4]$$

eşitliği kullanılmıştır (eşitlik 4).

Bu test, Tetra Pak içeriğindeki LDPE ve alüminyum katmanlarının, dış yüzeydeki doğal ahşap kaplamalarla olan etkileşimini ve polimerin bir su bariyeri olarak etkinliğini sayısal olarak ortaya koymuştur.

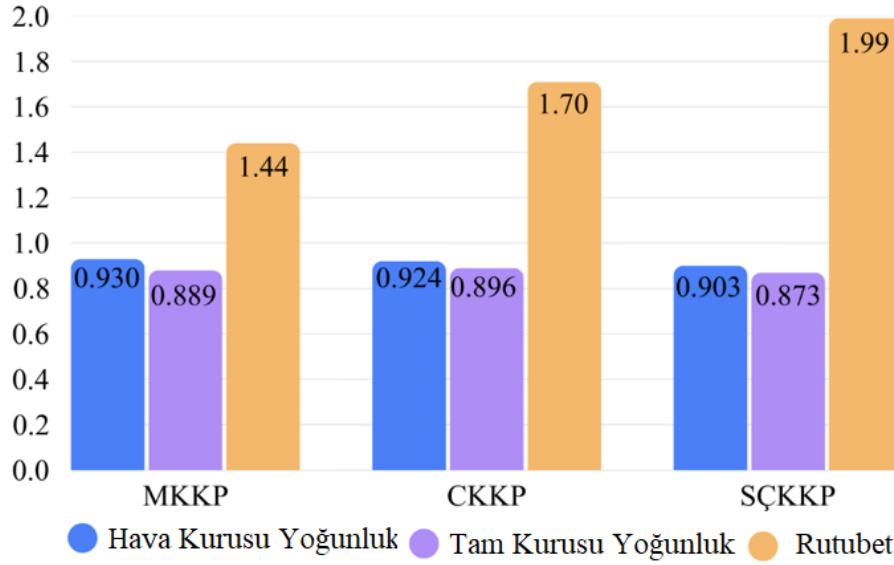
3.BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yoğunluk ve Rutubet Tayini

Malzemenin mekanik direncini ve boyutsal stabilitesini doğrudan etkileyen yoğunluk ve rutubet verileri Tablo 1’de ve Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerinin Temel Fiziksel Değerleri

Panel Tanımı	Tam Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Hava Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Rutubet (%)
MKKP	0.889	0.930	1.44
CKKP	0.896	0.924	1.70
SKKP	0.873	0.903	1.99



Şekil 1. : Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerinin Temel Fiziksel Özellikleri

Üretilen panellerin tam kuru yoğunluk değerleri 0,873-0,896 g/cm³ aralığında saptanmıştır. Bu değerler, malzemenin konvansiyonel MDF ve HDF levhalara eşdeğer veya daha yüksek bir yoğunluk karakteristiğine sahip olduğunu göstermektedir (Ayrılmış vd., 2008). Panellerin rutubet değerleri %1,44-1,99 aralığında olup, masif ahşabın standart değerlerinden (%8-12) önemli ölçüde düşüktür.

3.2 Kalınlığına Şişme ve Su Alma Performansı

TS EN 317 24 saatlik su alma testi sonuçlarına göre Tablo 2’de verilmiştir. Numunelerin kalınlığına şişme oranları %1.77-2.88 aralığında gerçekleşmiştir. Görsel.4’ de ise örneklerin deney öncesi ve sonrası görselleri verilmiştir.

Tablo2. Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerinin Şişme Değerleri

Panel Tanımı	Su alma(%)	24h Şişme (%)
MKKP	6.76	2.88
CKKP	7.40	1.77
SKKP	7.03	2.31

TS EN 312 standardına göre yük taşıyıcı levhalar için öngörülen limitlerin oldukça altında kalan bu performans, piyasadaki standart yonga levhaların (%12-15) yaklaşık iki katı daha iyi bir su direnci sunmaktadır. Bu durum, TetraPak içeriğindeki LDPE ve alüminyum katmanlarının

hidrofobik bir bariyer oluşturarak ahşap liflerinin su absorpsiyonunu sınırladığını kanıtlamaktadır (Zawadiak vd., 2017).



Görsel 4. Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerin deney öncesi ve sonrası

Mevcut sektörel bazda inceleme sağlandığında dünyada yılda yaklaşık 36 milyon m³ OSB (Oriented Strand Board) üretilmektedir (WBPI, 2023). 1 m³ OSB üretimi için yaklaşık 1,8 - 2,0 m³ endüstriyel odun tüketilmektedir (CORRIM, 2021). Bu durum, her metre küp üretimde ortalama iki yetişkin ağacın kesilmesi anlamına gelmektedir. Buna karşın, geliştirilen APK panellerin üretimiyle, 1 m³ levha başına yaklaşık 8.000-10.000 adet atık kartonun düzenli depolama sahalarına gitmesi veya bozunma sürecinde atmosfere metan gazı salması önlenmektedir (IPCC, 2022). Küresel OSB üretiminin yalnızca %10'unun bu ileri dönüşüm ürünü kompozit levhalarla ikame edilmesi halinde, yıllık yaklaşık 7,2 milyon yetişkin ağaç kesilmekten kurtarılabilir. Bu kazanım, orman alanlarının yıllık ortalama büyüme kapasitesi olan 5,1 m³/ha verisi temel alındığında (LUKE, 2023), yıllık yaklaşık 1,4 milyon hektar orman alanının toplam büyüme hacmine eşdeğer bir ekosistem koruması sağlamaktadır.

Sürdürülebilir mimarlık ilkeleriyle uyum sergileyen bu ahşap plastik kompozit (APK) panel, döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda, “atık” sınıfındaki bir malzemenin yüksek katma değerli bir "hammadde" sınıfına başarıyla geçiş yaptığı görülmektedir (Najafi, 2013; Mısır ve Arıkan, 2022; Sev, 2009).

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Elde edilen bulgular, APK levhaların ilave bir yapıştırıcıya ihtiyaç duymaksızın "tutkalsız birleşmeyi" başarıyla gerçekleştirdiğini saptamıştır. Termoplastik bağlayıcılık görevini üstlenen TetraPak bünyesindeki LDPE (Düşük Yoğunluklu Polietilen), presleme sürecinde ahşap kaplamanın lümen boşluklarına nüfuz ederek güçlü bir mekanik tutunma (mechanical interlocking) sağlamıştır. TetraPak içeriğindeki polimerin doğal bağlayıcılığından faydalanılarak üretilen bu paneller, geleneksel levha üretimindeki formaldehit ve VOC (Uçucu Organik Bileşik) emisyonlarını tamamen elimine ederek insan sağlığına dost bir yapı

sergilemektedir (Robertson, 2021). Bu özellikleriyle ürün, sıfır atık ilkelerine uyumlu, yeşil bina sertifikasyon süreçlerinde (LEED, BREEAM vb.) güçlü bir aday konumuna gelmiştir. Panellerin TS EN standartlarında belirlenmiş fiziksel performans sınırlarına üstünlük sağlaması, piyasadaki konvansiyonel ürünlere (OSB, MDF, yonga levha) ciddi bir alternatif olabileceğini kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, APK panellerin fiziksel performans değerlerinin literatürdeki benzer çalışmalarla paralel ve hatta bazı parametrelerde (kalınlığına şişme direnci gibi) daha üstün sonuçlar vermesi, malzemenin endüstriyel ölçekte sürdürülebilir bir hammadde potansiyeli taşıdığını ve ticari ölçekte uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 2024/1. Döneminde TÜBİTAK tarafından desteklenen, 1919B012470092 numaralı, “Ahşap Laminasyonunda Plastik Eklemeli Kompozit Malzeme Kullanılması” adlı TÜBİTAK projesinden üretilmiştir. TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

5. KAYNAKÇA

1. Ayrılmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., & Bauchonguatana, P. (2008). Physical and mechanical properties of composite panels made from used beverage cartons. *Materials & Design*, 29(7), 1397–1403. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.01.014>
2. Bal, B. C. (2022). Lineer düşük yoğunluklu polietilen (LDYPE) ve odun unu ile üretilen kompozit malzemenin bazı mekanik özellikleri üzerine bir araştırma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 40-49.
3. Baltacı, I. (2023). *Atık Tetra Pak aseptik ambalajlarından karton, düşük yoğunluklu polietilen, alüminyum bileşenlerinin geri kazanımı* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
4. Bhaskar, K., Jayabalakrishnan, D., Kumar, M. V., Sendilvelan, S., ve Prabhakar, M. (2020). Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 2231–2234. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.577>
5. Bilgili, M. Y. (2023). Geri dönüşüm, döngüsel ekonomi ve sıfır atık odaklı bir model önerisi: Türkiye atık bankaları. L. Memiş ve M. Y. Bilgili (Ed.), *Dev kentlerin sessiz krizi: Atıklar içinde* (s. 1-22). Çizgi Kitabevi.
6. CORRIM. (2021). Life cycle assessment of oriented strand board (OSB) production. Consortium for Research on Renewable Industrial Materials. <https://corrim.org/wp-content/uploads/Module-E-OSB-Final-w-survey.pdf>

7. Enç, V., Uzun, S. E., & Hoşoğlu, F. (2012). Atık kompozit içecek kartonları geri dönüşüm yöntemleri. *Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 1(4), 184-194. [Özel Sayı: Tüketim Toplumu ve Çevre]. <https://doi.org/10.7596/taksad.v1i4.120>
8. IPCC. (2022). Waste management and methane emissions. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=120>
9. LUKE. (2023). Forest growth rate and volume of growing stock. Natural Resources Institute Finland. <https://www.luke.fi/en/news/forest-growth-rate-decelerated-volume-of-growing-stock-increased>
10. Mısıır, A. ve Arıkan, O. A. (2022). Sıfır atık yönetimi ve döngüsel ekonomi. *TÜBA Yayınları*, s. 205-223. <https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-57-3.ch11>
11. Najafi, S. K. (2013). Use of recycled plastics in wood-plastic composites – A review. *Waste Management*, 33(9), 1898–1905. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017>
12. Rancea, M., Nemeş, O., & Bizo, L. (2025). Thermal behaviour of composite materials obtained from recycled Tetra Pak® by thermoplastic forming. *Studia UBB Chemia*, 70(1), 23–34. <https://doi.org/10.24193/subbchem.2025.1.02>
13. Robertson, G. L. (2021). Recycling of aseptic beverage cartons: A review. *Packaging Technology and Science*, 34(6), 325–342. <https://doi.org/10.1002/pts.2562>
14. Recupido, F., Lama, G. C., Lavorgna, M., Buonocore, G. G., Marzella, R., & Verdolotti, L. (2023). Post-consumer recycling of Tetra Pak®: Starting a “new life” as filler in sustainable polyurethane foams. *Food Packaging and Shelf Life*, 40, 101175. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101175>
15. Schwarzkopf, M. J., ve Burnard, M. D. (2016). Wood-plastic composites—Performance and environmental impacts. R. Kutnar ve S. S. Muthu (Ed.), *Environmental impacts of traditional and innovative forest-based bioproducts* içinde (s. 19–43). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0655-5_2
16. Sev, A. (2009). *Sürdürülebilir mimarlık*. YEM Yayınları.
17. Tetra Pak. (2022). *Sustainability Report FY22: Collection and Recycling*. Tetra Pak Group.
18. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Atık istatistikleri bülteni*. <https://webdosya.csb.gov.tr/v2/ced/2025/12/2023-y-l-at-k-istatistik-b-lteni-005-2-20251226151737.pdf>
19. Türk Standardları Enstitüsü. (1999). *TS EN 317: Yonga levhalar ve lif levhalar - Su içerisine daldırıldıktan sonra şişme tayini*.
20. Türk Standardları Enstitüsü. (1999). *TS EN 322: Ahşap esaslı levhalar - Rutubet miktarının tayini*.
21. Türk Standardları Enstitüsü. (1999). *TS EN 323: Ahşap esaslı levhalar - Birim hacim ağırlık (yoğunluk) tayini*.
22. Türk Standardları Enstitüsü. (2012). *TS EN 312: Yonga levhalar - Özellikler*.
23. Zawadiak, J., Wojciechowski, S., Piotrowski, T., & Krypa, A. (2017). Tetra Pak recycling – Current trends and new developments. *American Journal of Chemical Engineering*, 5(3), 37–42. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170503.12>
24. WBPI. (2023, 14 Eylül). OSB still a top performer. Wood Based Panels International. <https://www.wbpionline.com/analysis/osb-still-a-top-performer-9728235/>

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE GERÇEK VE SİMÜLASYON TABANLI TESİSLERDE PERFORMANS ANALİZİ

Şeyma BİLGİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi,
seymabilgin61@gmail.com - 0009-0003-7082-2712

Dr. Öğr. Üyesi Yahya DANAYİYEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi,
yahya@ktu.edu.tr - 0000-0002-8679-4088

ÖZET

Güneş enerji santrallerinde (GES) tasarım aşamasında kullanılan simülasyon yazılımları, yatırım kararlarının alınması ve üretim projeksiyonlarının oluşturulması açısından temel araçlar arasında yer almaktadır. Ancak simülasyon tabanlı üretim tahminlerinin gerçek işletme verileri ile ne ölçüde örtüştüğü, tesis performansının doğru değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, güneş enerji santrallerinde gerçek üretim verileri ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak performans analizine odaklanmaktadır.

Araştırma kapsamında farklı iklim bölgelerinde yer alan fotovoltaik tesisler HelioScope, Global Solar Atlas (GSA) ve JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) yazılımları kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon çıktıları, işletmede bulunan tesislerden elde edilen evirici üretim verileri ve sayaç ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Performans değerlendirmesi özgül üretim (kWh/kWp) değerleri üzerinden aylık ve yıllık bazda gerçekleştirilmiş, simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verileri arasındaki sapma oranları hesaplanarak model doğruluğu nicel olarak ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgular, simülasyon yazılımlarının yıllık üretim tahminlerinde genel olarak kabul edilebilir doğruluk seviyelerine ulaştığını; ancak aylık bazda iklimsel değişkenlik, sıcaklık etkileri ve bölgesel ışıyım farklılıklarına bağlı olarak üretim değerlerinde belirgin sapmalar oluşabildiğini göstermektedir. Nitekim yıllık bazda Aktaş-1 tesisinde HelioScope sonucu evirici verisine göre %23,98 oranında pozitif sapma gösterirken, Ç. Kardeşler tesisinde bu oran %26,00 seviyesine ulaşmıştır. Buna karşılık Gündoğdu-2 tesisinde GSA ile gerçek evirici verisi arasındaki fark yalnızca -%0,12 düzeyinde gerçekleşmiştir. Çalışma sonucunda, gerçek saha verileri ile desteklenmeyen simülasyon tahminlerinin tek başına yeterli olmayabileceği ve performans analizlerinde çok boyutlu değerlendirme yaklaşımının gerekli olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerji santrali, Performans analizi, Simülasyon yazılımları, Özgül üretim, Sapma analizi

1.GİRİŞ

Enerji, ekonomik büyüme, sanayileşme ve toplumsal sürdürülebilirliğin sağlanması açısından temel bir gereksinimdir. Sanayi Devrimi'nden itibaren hızlanan sanayileşme, nüfus artışı ve kentleşme süreçleri enerji talebinin önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. Günümüzde enerji üretimi büyük ölçüde fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerjiye dayanmaktadır (Güner ve ark., 2021; Kocalmış Bilhan ve Emikönel, 2021). Enerji kaynakları genel olarak tükenebilir fosil yakıtlar ile doğal döngüler içerisinde kendini yenileyebilen kaynaklar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır (Taghiyev, 2023). Bununla birlikte fosil yakıtların neden olduğu sera gazı emisyonları, çevresel bozulma ve sürdürülebilirlik sorunları enerji sistemlerinde daha temiz ve sürdürülebilir alternatiflere yönelimi hızlandırmıştır (Akarsu, 2025; Kayışoğlu ve Diken, 2019).

Yenilenebilir enerji kaynakları; hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi farklı enerji türlerini kapsamaktadır (Sayyadov, 2023). Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel enerjisinin türbin-jeneratör sistemleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanır (Bodur ve Şenyuva, 2013). Rüzgâr enerjisi atmosferde oluşan hava akımlarının kinetik enerjisinin türbinler aracılığıyla elektrik üretiminde kullanılmasını esas almaktadır (Oral ve Behçet, 2015). Güneş enerjisi, güneşten gelen elektromanyetik ışıının fotovoltaik sistemler aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesine imkân tanımaktadır (İnce, 2021; Kılıç, 2015). Jeotermal enerji yer kabuğunun derinliklerinde depolanan ısının değerlendirilmesiyle elektrik ve ısı üretimi sağlayan bir enerji kaynağıdır (Acar ve Köseoğlu, 2021; Kozak, 2020). Biyokütle enerjisi ise tarımsal ve organik atıkların çeşitli dönüşüm süreçleri sonucunda enerjiye dönüştürülmesine dayanmaktadır (Demir, 2017; Bayraç ve Özarslan, 2018).

Son yıllarda yenilenebilir enerji teknolojilerinde yaşanan gelişmeler ve maliyet düşüşleri, bu kaynakların küresel enerji sistemleri içerisindeki payının giderek artmasına katkı sağlamaktadır (Şencan, 2022; Yıldız ve ark., 2020). Bu gelişmeler doğrultusunda güneş enerjisi; bol bulunabilirliği, sürdürülebilir yapısı ve düşük çevresel etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde öne çıkan bir enerji türü hâline gelmiştir. Güneş enerjisi fotovoltaik sistemler aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmekte ve enerji üretiminde önemli bir alternatif sunmaktadır (Güner ve ark., 2021).

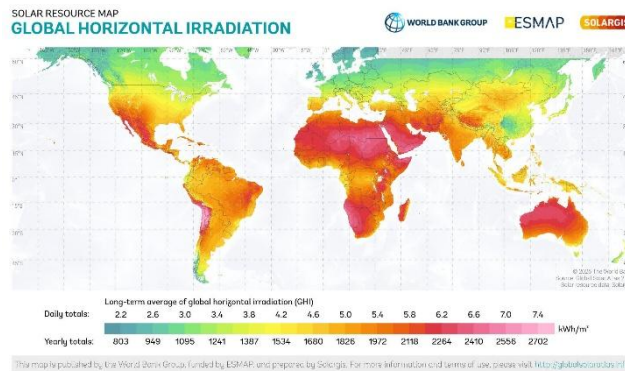
Güneş enerjisi, Güneş'in merkezinde gerçekleşen nükleer füzyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan enerjinin elektromanyetik dalgalar hâlinde yeryüzüne ulaşmasıyla oluşmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Fotovoltaik sistemlerde elektrik üretimi yarı iletken malzemelerde meydana gelen fotovoltaik etki sayesinde gerçekleşmekte; gelen fotonların oluşturduğu elektron-boşluk çiftleri p-n birleşimi yardımıyla ayrıştırılarak doğru akım elde edilmektedir (Öztürk, 2017). Bununla birlikte hücre sıcaklığı, güneş ışıını ve çevresel koşullar gibi parametreler güneş enerji santrallerinin gerçek saha performansını doğrudan etkilemektedir (Öztürk, 2017).

Güneş enerjisinden etkin biçimde yararlanabilmek için güneş geometrisinin doğru şekilde tanımlanması gerekmektedir. Enlem açısı bir noktanın Dünya üzerindeki konumunu belirler ve

güneş ışınlarının geliş açısını doğrudan etkiler (Jacobson, 2005). Deklinasyon açısı, Güneş ışınlarının ekvator düzlemi ile yaptığı açıyı ifade etmekte olup yıl boyunca $-23,45^\circ$ ile $+23,45^\circ$ arasında değişmektedir (Jacobson, 2005). Saat açısı güneşin gün içerisindeki konumunu tanımlamakta ve güneşin doğuş ile batış zamanlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır (Görcelioğlu, 1987). Zenit açısı güneş ışınlarının düşey doğrultu ile yaptığı açıyı ifade ederken ışınımın yüzeye ne kadar dik geldiğini göstermektedir (Duffie ve Beckman, 2013). Yükseklik (altitude) açısı ise güneşin ufuk düzlemi ile yaptığı açı olup zenit açısının tamamlayıcısıdır (Duffie ve Beckman, 2013). Azimut açısı ise güneşin yatay düzlemdeki yönünü tanımlamakta ve fotovoltaik panellerin yöneliminin belirlenmesinde temel bir parametre olarak kullanılmaktadır (Görcelioğlu, 1987; Duffie ve Beckman, 2013).

Güneş ışınımı doğrudan (direkt), yayılı (difüz) ve yansıyan (albedo) bileşenlerden oluşmakta olup bu bileşenlerin toplamı küresel ışınım olarak adlandırılmaktadır (Kabakcı ve Eke, 2018; Kaysal ve Hocaoglu, 2023). Bu nedenle güneş geometrisi ve radyasyon bileşenlerinin doğru modellenmesi, gerçek ve simülasyon tabanlı tesis performanslarının karşılaştırılmasında kritik öneme sahiptir.

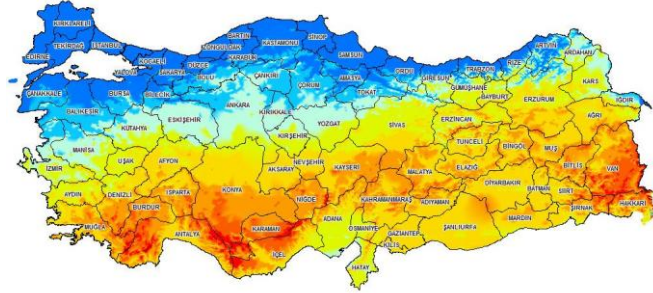
Dünya genelinde güneş enerjisi potansiyeli enlem, iklim tipi ve atmosferik koşullara bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Özellikle 40° kuzey ve 40° güney enlemleri arasında kalan bölgeler, yüksek güneşlenme süresi ve yüksek küresel yatay ışınım (Global Horizontal Irradiation – GHI) değerleri sayesinde fotovoltaik enerji üretimi açısından avantajlı alanlar olarak öne çıkmaktadır (Taşkın ve Korucu, 2014). Bu kuşak içerisinde yer alan Sahra Altı Afrika, Orta Doğu, Avustralya ve Güney Amerika'nın bazı bölgeleri yıllık ışınım değerlerinin yüksek olması nedeniyle dünya ölçeğinde en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip bölgeler arasında değerlendirilmektedir. Küresel yatay ışınımın uzun dönem ortalama dağılımını gösteren dünya güneş enerjisi potansiyel haritası Görsel 1'de sunulmakta olup, harita özellikle söz konusu enlem kuşağında güneş enerjisi potansiyelinin belirgin biçimde yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (World Bank Group, 2020).



Görsel 1. Dünya Geneline Küresel Yatay Işınımın (GHI) Uzun Dönem Yıllık Ortalama Dağılımı, (World Bank Group, 2020)

Türkiye coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre Türkiye’de günlük ortalama güneşlenme

süresi yaklaşık 7,5 saat olarak hesaplanmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, GEPA). GEPA verileri Türkiye genelinde güneş enerjisi potansiyelinin bölgesel olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymakta; özellikle Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve İç Anadolu'nun güney kesimlerinde yıllık güneş ışıınım değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye'de güneş enerjisi potansiyelinin mekânsal dağılımını gösteren harita Görsel 2'de sunulmakta olup, harita ülke genelinde güneş enerjisi potansiyelinin özellikle güney ve iç bölgelerde daha yüksek seviyelerde olduğunu ortaya koymaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, GEPA).



Görsel 2. Türkiye’de Uzun Dönem Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası, (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, GEPA)

Kurulu güç gelişimi incelendiğinde Türkiye’de güneş enerjisi kapasitesinin son yıllarda önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Temmuz 2022’de yaklaşık 9,7 GW olan kurulu güç, 2024 yılı sonunda 19,6 GW seviyesini aşmıştır (Ember, 2025). Bu artışta özellikle çatı tipi ve öztüketim odaklı lisanssız fotovoltaik projelerinin önemli rol oynadığı görülmektedir (Ember, 2025). Türkiye’de elektrik üretim altyapısının kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde hidroelektrik, güneş, doğal gaz ve rüzgâr enerjisinin kurulu güç içerisinde önemli paylara sahip olduğu görülmektedir. Türkiye’de elektrik kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı Çizelge 1’de sunulmakta olup, veriler güneş enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payının %20’nin üzerine çıkarak Türkiye elektrik sisteminde önemli bir konuma ulaştığını göstermektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2026).

Çizelge 1. 2025 Yılı Aralık Ayı Sonu İtibariyle Elektrik Kurulu Gücünün Kaynaklara Göre Dağılımı (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2026)

Kaynak	Kurulu Güç (MW)	Pay (%)
Hidroelektrik	32.294	26,4
Güneş	25.109	20,5
Doğal Gaz	24.232	19,8
Rüzgâr	14.774	12,1
Yerli Kömür	11.550	9,4
İthal Kömür	10.456	8,5
Biyokütle	2.346	1,9

Jeotermal	1.758	1,4
Toplam	122.519	%100

Ulusal Enerji Planı kapsamında 2035 yılına kadar güneş ve rüzgâr enerjisinde toplam 120 GW kurulu güce ulaşılması hedeflenmekte olup bunun yaklaşık 53 GW'lık kısmının güneş enerjisinden sağlanması öngörülmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022) ve aynı zamanda 2030 yılına kadar güneş enerjisinin Türkiye'nin elektrik ihtiyacının yaklaşık %30'unu karşılayabileceği öngörülmektedir (Yılmaz, 2024). Bu hedefler doğrultusunda güneş enerjisi Türkiye'nin enerji arz güvenliği, dışa bağımlılığın azaltılması ve sürdürülebilir enerji dönüşümü açısından stratejik bir kaynak olarak değerlendirilmektedir.

Bu teknik ve yapısal çerçeve, güneş enerji santrallerinde simülasyon temelli üretim tahminleri ile gerçek performans verilerinin karşılaştırılmasına yönelik analizlerin teorik altyapısını oluşturmaktadır.

Türkiye'de elektrik üretiminde kullanılan kaynakların kurulu güç dağılımı incelendiğinde, güneş enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payının yaklaşık %20,5 seviyesine ulaştığı ve kurulu gücün 25.109 MW düzeyine çıktığı görülmektedir. Bu durum, güneş enerjisinin Türkiye elektrik sisteminde giderek daha önemli bir konuma geldiğini göstermektedir. Nitekim Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan verilere göre, güneş enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payı son yıllarda hızla artmış ve toplam kurulu gücün yaklaşık beşte birine ulaşmıştır.

Güneş enerjisi santralleri farklı uygulama tiplerinde kurulabilmekte olup, bunlardan biri de çatı tipi fotovoltaik sistemlerdir. Çatı tipi güneş enerjisi sistemleri; dağıtık üretim yapıları, tüketim noktasına yakın kurulmaları ve iletim-dağıtım kayıplarını azaltmaları gibi avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, diğer güneş enerjisi santral türlerinde olduğu gibi çatı tipi sistemlerin kurulumu öncesinde de güneşlenme potansiyeli, çatı yönelimi ve eğimi, gölgelenme etkileri, taşıyıcı sistem uygunluğu ve elektriksel altyapı gibi teknik parametrelerin detaylı şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

Simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verilerinin karşılaştırılması; yatırım öncesinde amortisman süresinin belirlenmesi, uygun malzeme seçiminin yapılması ve kurulacak sistem kapasitesinin toplam elektrik ihtiyacını ne ölçüde karşılayabileceğinin tespit edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla fotovoltaik sistemlerin performansının değerlendirilmesine yönelik olarak literatürde ve uygulamada çeşitli analiz yöntemleri ve simülasyon araçları geliştirilmiştir.

Fotovoltaik (FV) sistemlerin performans analizi ve enerji üretim tahminlerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla literatürde çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların önemli bir kısmında simülasyon yazılımları ile elde edilen üretim değerleri ile gerçek santral üretim verileri karşılaştırılarak sistem performansı analiz edilmiştir.

Tanış ve Altıntaş tarafından gerçekleştirilen çalışmada Elâzığ ilinde kurulu 1036,8 kWp gücündeki bir fotovoltaik güneş enerji santralinin ölçülen üretim verileri ile PVsyst simülasyon

programı kullanılarak elde edilen üretim tahminleri karşılaştırılmış ve yıllık özgül üretim değerleri arasında yaklaşık %4,73'lük bir fark olduğu belirlenmiştir (Tanış ve Altıntaş, 2023).

Benzer şekilde Şahin ve Salihmuhsin tarafından yapılan çalışmada Kahramanmaraş ili Göksun ilçesinde bulunan 1179 kWp kurulu güce sahip bir güneş enerji santralinin gerçek üretim verileri ile PVsyst simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve iki veri seti arasında oldukça düşük seviyede (%0,203) bir sapma olduğu tespit edilmiştir (Şahin ve Salihmuhsin, 2024).

Dundar ve Şeker tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise Sivas Cumhuriyet Üniversitesi kampüsünde planlanan 278 kWp gücündeki çatı tipi fotovoltaik sistem için PVsyst simülasyonu yapılmış ve simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verileri karşılaştırılarak yaklaşık %0,56'lık bir fark elde edilmiştir (Dundar ve Şeker, 2025).

Literatürde bazı çalışmalarda ise fotovoltaik sistem performansı farklı panel teknolojileri açısından değerlendirilmiştir. İzgi ve Özcan tarafından yapılan çalışmada Bursa ilinde kurulu 1 MW gücündeki bir fotovoltaik sistemde monokristal, polikristal ve ince film panel teknolojileri karşılaştırılmış ve farklı panel teknolojilerinin yıllık üretim performansları PVsyst ve PVSOL simülasyon ortamında analiz edilmiştir (İzgi ve Özcan, 2020). Ancak bu çalışmada elde edilen sonuçlar tamamen simülasyon verilerine dayandırılmış olup gerçek üretim verileri ile karşılaştırma yapılmamıştır.

Bazı araştırmalarda ise sistem performansı yerine tasarım parametreleri incelenmiştir. Yağlı ve Koç tarafından yapılan çalışmada Gaziantep bölgesi için fotovoltaik panellerin optimum eğim açısının belirlenmesi amaçlanmış ve Perez transpozisyon modeli kullanılarak optimum eğim açısı yaklaşık 31° olarak hesaplanmıştır (Yağlı ve Koç, 2020). Ancak bu çalışmada analizler yalnızca tek bir bölge üzerinden gerçekleştirilmiş olup sadece PVsyst simülasyonu kullanıldı fakat gerçek üretim verileri kullanılmamıştır.

Diğer taraftan literatürde yer alan bazı tez çalışmalarında gerçek üretim verileri ile farklı simülasyon yazılımlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Örneğin Konya ili koşullarında gerçekleştirilen bir tez çalışmasında 1 MW kurulu güce sahip bir güneş enerji santralinin üretim verileri ile PVsyst ve PVSOL simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve yazılımların üretim tahmin doğruluğu değerlendirilmiştir (Üründü, 2025).

Benzer şekilde Antalya ilinde gerçekleştirilen bir başka tez çalışmasında ise çatı tipi bir güneş enerji santralinin gerçek üretim verileri ile PVsyst ve PVSOL simülasyon sonuçları karşılaştırılarak sistem performansı analiz edilmiştir (Akarsu, 2025).

Literatürdeki bu çalışmalar incelendiğinde, analizlerin büyük çoğunluğunun tek bir güneş enerji santrali üzerinden gerçekleştirildiği, kullanılan simülasyon araçlarının ise genellikle bir veya iki yazılım ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Ayrıca bazı çalışmalarda yalnızca simülasyon verileri kullanılmış olup gerçek üretim verileri ile doğrulama yapılmamıştır. Bu durum, elde edilen sonuçların farklı tesisler ve farklı coğrafi koşullar için genellenebilirliğini sınırlamaktadır.

Bu çalışmada ise literatürdeki bu sınırlılıkların giderilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda farklı coğrafi koşullara sahip beş farklı güneş enerji santraline ait gerçek üretim verileri kullanılmış ve bu veriler HelioScope, PVGIS ve Global Solar Atlas tabanlı üç farklı simülasyon yöntemi ile elde edilen üretim tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece yalnızca tek bir tesis üzerinden gerçekleştirilen çalışmalardan farklı olarak daha geniş bir veri seti ve üç farklı simülasyon araçlarının doğruluğu değerlendirilmiştir böylece elde edilen sonuçların daha genellenebilir ve güvenilir olması hedeflenmiştir.

2.SİMULASYON ÇALIŞMALARI

Güneş enerji santrallerinde simülasyon çalışmaları, yatırım öncesinde üretim tahmini yapılması ve sistem tasarımının optimize edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu yazılımlar; coğrafi konum, meteorolojik veriler, panel–evirici seçimi ve sistem kayıpları gibi parametreleri dikkate alarak aylık ve yıllık üretim projeksiyonları oluşturmaktadır. Bu çalışmada, HelioScope (Aurora Solar, 2025). Global Solar Atlas (GSA) (World Bank Group, 2024) ve PVGIS (European Commission, 2024) yazılımları kullanılarak farklı tesisler modellenmiş; elde edilen simülasyon sonuçları gerçek evirici üretim verileri ile karşılaştırılmıştır. Böylece simülasyon tabanlı tahminlerin saha performansı ile uyumu değerlendirilmiş ve yazılımlar arasındaki farklılıklar analiz edilmiştir.

HelioScope, detaylı saha modellemesine imkân tanıyan ve gölgeleme analizlerini üç boyutlu ortamda gerçekleştirebilen bir simülasyon yazılımıdır. Panel yerleşimi, evirici konfigürasyonu, DC/AC oranı ve sistem kayıpları ayrıntılı biçimde tanımlanabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde HelioScope sonuçları, gerçek tesis performansına en yakın referans değer olarak değerlendirilmiş ve diğer yazılımların sonuçları ile karşılaştırma amacıyla temel alınmıştır.

Global Solar Atlas (GSA), küresel ölçekte güneş ışıınımı verilerine dayanan ve özellikle global yatay ışıınım (GHI) değerleri üzerinden üretim tahmini yapan bir platformdur. GSA, saha bazlı detaylı tasarım yerine ışıınım temelli potansiyel analizi sunmaktadır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, diğer simülasyon yazılımlarına kıyasla daha genel karakterlidir. Çalışmada GSA verileri, diğer simülasyon çıktıları ve gerçek üretim değerleri ile karşılaştırılarak sapma oranları değerlendirilmiştir.

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen ve geniş kapsamlı meteorolojik veri tabanına dayanan bir çevrimiçi simülasyon platformudur. Sistem parametrelerinin daha genel düzeyde tanımlandığı bu yazılım, özellikle bölgesel üretim potansiyelinin hızlı şekilde değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. PVGIS çıktıları, HelioScope sonuçları ve gerçek evirici verileri ile karşılaştırılarak modelleme doğruluğu analiz edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında öncelikle farklı coğrafi bölgelerde yer alan beş adet lisanssız güneş enerji santraline ait gerçek üretim verileri ile simülasyon tabanlı üretim tahminleri karşılaştırılmıştır. Analiz sürecinde HelioScope, Global Solar Atlas (GSA) ve PVGIS olmak üzere üç farklı simülasyon yazılımı kullanılmış ve her bir tesis için elde edilen simülasyon çıktıları gerçek evirici üretim verileri ile karşılaştırılarak performans değerlendirmesi

yapılmıştır. Böylece farklı simülasyon araçlarının üretim tahmin doğruluğu çoklu tesis verileri üzerinden incelenmiş ve simülasyon sonuçları ile saha performansı arasındaki farklar nicel olarak ortaya konmuştur. Bu kapsamda her bir tesis için simülasyon ve gerçek üretim değerleri arasındaki sapma oranları (%) hesaplanarak yazılımların üretim tahmin doğruluğu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada ise simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verileri arasındaki uyumun en yüksek olduğu tesis belirlenmiş ve bu tesis için daha detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilgili santral için aylık bazda Global Solar Atlas simülasyon çıktıları, evirici üretim verileri ve dağıtım şirketine ait üretim sayacı ölçümleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sayesinde yalnızca simülasyon ve gerçek üretim arasındaki ilişki değil, aynı zamanda evirici üretim verileri ile şebeke üretim sayacı ölçümleri arasındaki uyum da değerlendirilmiştir. Ayrıca aylık üretim değerleri üzerinden yapılan analizlerde dönemsel sapmalar incelenmiş ve simülasyon tahminlerinin yıl içindeki doğruluk seviyeleri değerlendirilmiştir.

Gerçek üretim verileri ile simülasyon çıktılarının birlikte değerlendirilmesi, güneş enerji santrallerinin yatırım öncesi fizibilite çalışmalarında önemli bir karar destek aracı sunmaktadır. Bu tür analizler sayesinde kurulması planlanan sistemin yıllık üretim potansiyeli, geri ödeme süresi (amortisman) ve öz tüketim–mahsuplaşma senaryoları kurulum öncesinde öngörülebilmektedir. Ayrıca üretim fazlasının şebekeye satılması veya tüketim ile dengelenmesi gibi farklı işletme senaryoları da simülasyon ortamında analiz edilebilmekte ve yatırımcıların daha doğru kapasite ve sistem tasarımı kararları almasına katkı sağlamaktadır.

2.1. Güneş Enerji Santrallerinin Sistem Girdileri

Sivas (Aktaş-1) Erzurum (Erko-1), Erzincan (Çadırtepe Kardeşler), Trabzon (Gündoğdu-2) ve Kocaeli (Anonim-1) illerinde kurulu tesislere ait evirici üretim kayıtları ve yıllık toplam üretim değerleri analiz edilmiştir. Gündoğdu-2 GES evirici üretim verileri ile EDAŞ tek yönlü üretim verileri ayrıca karşılaştırılmıştır. Çizelge 2’de tesislere ait HelioScope, Global Solar Atlas ve PVGIS’te kullanılan sistem parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2. Farklı İllerdeki 5 Adet Çatı GES İçin Sistem Parametreleri

Tesis Adı (GES)	İl	AA/DA Güç	Azimut(lar) (°)	Çatı Eğimi (°)
Aktaş-1	Sivas	60/72,80	177°	12°
Erko-1	Erzurum	240/288,50	198° ve 287,1°	14°
Ç. Kardeşler	Erzincan	60/71,89	115° ve 290°	9°
Gündoğdu-2	Trabzon	1100/1463	74° ve 254°	14°
Anonim-1	Kocaeli	600/703,8	149° ve 329°	6°

Çizelge 2’de verilen sistem parametreleri incelendiğinde, farklı illerde kurulu beş adet çatı tipi GES’in hem kurulu güç hem de yönelim–eğim açısından birbirinden farklı tasarım özelliklerine sahip olduğu görülmektedir. Kurulu güç bakımından en yüksek kapasiteye sahip tesis

Gündoğdu-2 (Trabzon) olup 1100/1463 kW AA/DA değerine sahiptir. En düşük kurulu güçler ise 60–72 kW aralığında olan Aktaş-1 (Sivas) ve Ç. Kardeşler (Erzincan) tesislerinde görülmektedir. DA/AA oranları incelendiğinde tüm tesislerde evirici kapasitesine kıyasla panel gücünün daha yüksek seçildiği, yani bilinçli bir panel gücünün, evirici gücünden fazla uygulandığı anlaşılmaktadır. Bu yaklaşım özellikle düşük ışıyım saatlerinde eviricinin daha verimli çalışmasını sağlamak amacıyla tercih edilmektedir.

Azimut açıları değerlendirildiğinde tesislerin büyük kısmında çift yönlü (doğu-batı veya farklı cephe kombinasyonlu) yerleşim tercih edildiği görülmektedir. Gündoğdu-2 tesisinde 74° ve 254° yönelimleri belirgin bir doğu-batı yerleşimini göstermekte olup özellikle çatı uygulamalarında yaygın bir çözümdür. Çatı eğimleri ise 6° ile 14° arasında değişmekte; en düşük eğim Anonim-1 (Kocaeli) tesisinde, en yüksek eğimler ise 14° ile Erko-1 (Erzurum) ve Gündoğdu-2 (Trabzon) tesislerinde görülmektedir. Bu farklılıklar hem bölgesel enlem koşulları hem de mevcut çatı mimarisi ile ilişkilidir. Genel olarak tablo, tesis performans analizlerinde yönelim, eğim ve DA/AA oranı gibi tasarım parametrelerinin simülasyon sonuçları ile gerçek üretim değerleri arasındaki sapmalar üzerinde belirleyici olabileceğini göstermektedir.

2.2. Güneş Enerji Santrallerinin Sistem Çıktıları

Bu bölümde, farklı illerde konumlanan ve çatı tipleri, yönelimleri (azimut), eğim açıları ve çevresel koşulları bakımından birbirinden ayrılan beş adet güneş enerjisi santraline ait simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır ve elde edilen veriler Çizelge 3'te gösterilmiştir. İncelenen tesisler; sanayi çatısı, depo çatısı ve ticari yapı çatısı gibi farklı geometrilere sahip olup, her biri kendi özel saha koşulları altında değerlendirilmiştir.

Çizelge 3. Tesislerin Simülasyon Sonuçları ve Gerçek Verileri

Tesis Adı (GES)	HelioScope Yıllık Üretimi (kWh)	GSA Yıllık Üretimi (kWh)	PVGIS Yıllık Üretimi (kWh)	Evirici 2025 Yıllık Üretimi (kWh)
Aktaş-1	122.064	109.523	107.607	98.460
Erko-1	462.200	414.111	330.066	422.751
Ç.Kardeşler	109.952	105.548	98.855	87.260
Gündoğdu-2	1.707.329	1.432.395	1.362.860	1.434.100
Anonim-1	843.434	794.624	798.048	772.445

Öncelikle genel eğilim incelendiğinde HelioScope sonuçlarının tüm tesislerde en yüksek üretim tahminini verdiği görülmektedir. GSA ve PVGIS değerleri ise çoğunlukla birbirine daha yakın olup HelioScope'a göre daha konservatif sonuçlar üretmiştir. Bu durum, HelioScope'un detaylı saha modellemesi (gölgeleme, string yerleşimi, kayıp kalemlerinin ayrı ayrı tanımlanması) sayesinde daha iyimser fakat saha koşullarına bağlı olarak sapma gösterebilen sonuçlar üretmesiyle ilişkilendirilebilir.

Erko-1 GES özelinde evirici üretimi (422.751 kWh), HelioScope tahmininden düşük, GSA tahminine oldukça yakın ve PVGIS tahmininden belirgin şekilde yüksektir. Bu durum, PVGIS'in özellikle iki farklı azimutlu çatı geometrisini tam temsil edememesi ve sistem kayıplarını daha genel varsayımlarla hesaplamasından kaynaklanabilir. Erko-1 için gerçek üretim, simülasyon ortalamalarına yakın bir değer sergileyerek modelleme doğruluğunun kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.

Aktaş-1 GES tesislerinde evirici üretimi, PVGIS ve GSA sonuçlarına oldukça yakın seyretmektedir. Bu durum küçük güçteki çatı sistemlerinde genel varsayımların sahayı daha doğru temsil ettiğini göstermektedir. Sapmaların düşük olması, sistem kayıplarının simülasyon varsayımlarıyla uyumlu olduğunu düşündürmektedir.

Gündoğdu-2 GES'te evirici üretimi (1.434.100 kWh), GSA ve PVGIS sonuçlarına oldukça yakın olup HelioScope tahmininden düşüktür. Bu tesis büyük ölçekli olduğundan, simülasyon–gerçek üretim arasındaki yüzdesel fark daha sınırlı kalmıştır. Ayrıca bu tesis için çift yönlü sayaç verisi bulunması, ilerleyen analizlerde evirici–şebeke ölçümü karşılaştırmasının yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Anonim-1 GES'te evirici üretimi, üç yazılımın ortalamasına oldukça yakındır. Bu durum sistem tasarım parametrelerinin (azimut, eğim ve DA/AA oranı) saha koşullarını doğru temsil ettiğini göstermektedir.

Büyük ölçekli tesislerde (Gündoğdu-2) GSA'nın saha verisine en yakın tahmini verdiği görülmektedir. Buna istinaden ay bazında üretim verilerinin karşılaştırması GSA ve Gündoğdu-2 GES üzerinden incelenecektir. Tablo 4'te Gündoğdu-2 GES için GSA, evirici üretim verileri ve EDAŞ tek yönlü üretim sayacı karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 4. Gündoğdu-2 GES GSA, Evirici ve EDAŞ Üretim Sayacı Aylık Verileri

Aylar	GSA (kWh)	2025 Evirici (kWh)	Üretim Sayacı (kWh)
Ocak	59.148,80	70.620,00	72.124,88
Şubat	77.584,00	56.300,00	60.098,80
Mart	112.930,60	137.000,00	137.183,20
Nisan	143.479,10	109.550,00	112.662,40
Mayıs	175.675,40	187.130,00	190.396,80
Haziran	182.097,30	202.260,00	202.100,00
Temmuz	177.080,60	166.610,00	170.389,20
Ağustos	151.121,10	151.940,00	152.077,20
Eylül	130.902,10	129.300,00	129.298,00
Ekim	98.533,10	95.610,00	97.738,80
Kasım	70.364,30	78.030,00	77.725,20

Aralık	53.479,40	49.750,00	49.349,20
Toplam	1.432.395,80	1.434.100,00	1.451.759,20

Çizelge 4’te Gündoğdu-2 GES için GSA simülasyon verileri, 2025 evirici üretim değerleri ve EDAŞ tek yönlü üretim sayacı verileri aylık bazda karşılaştırılmıştır. Yıllık toplam değerlere bakıldığında GSA 1.432.395 kWh, evirici 1.434.100 kWh ve üretim sayacı 1.451.759 kWh üretim göstermektedir. Bu sonuçlar, GSA ile evirici verisi arasında yalnızca yaklaşık %0,12 düzeyinde çok düşük bir sapma bulunduğunu; sayaç verisinin ise evirici değerinden yaklaşık %1,2 oranında daha yüksek gerçekleştiğini göstermektedir. Yıllık bazda değerlendirildiğinde GSA tahmininin oldukça başarılı ve gerçek üretime yakın olduğu söylenebilir.

Aylık dağılım incelendiğinde ise dönemsel sapmaların daha belirgin olduğu görülmektedir. Özellikle şubat ayında GSA değeri evirici üretimine kıyasla belirgin şekilde yüksek tahmin üretmiş; buna karşılık mart ve haziran aylarında evirici ve sayaç verileri GSA tahmininin üzerinde gerçekleşmiştir. Yaz aylarında (haziran–temmuz–ağustos) üç veri setinin birbirine oldukça yakın olduğu, özellikle ağustos ve eylül aylarında farkların minimum seviyeye indiği dikkat çekmektedir. Kış aylarında (ocak, şubat, aralık) ise meteorolojik değişkenlik ve bulutluluk etkisi nedeniyle sapmaların arttığı görülmektedir.

Evirici ve EDAŞ üretim sayacı değerleri genel olarak birbiriyle oldukça uyumludur; aradaki küçük farklar ölçüm noktası farklılığı, reaktif/aktif enerji hesap yöntemleri veya sistem içi kayıplardan ya da kısa süreli internet kopukluklarından kaynaklanabilir. Genel değerlendirme olarak, Gündoğdu-2 GES özelinde GSA simülasyon çıktılarının yıllık üretim tahmininde yüksek doğruluk sağladığı; ancak aylık bazda özellikle düşük ışıınım dönemlerinde sapmaların artabildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durum, simülasyon sonuçlarının yatırım öncesi güvenilir bir referans sunduğunu ancak aylık performans analizlerinde gerçek saha verileri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Evirici 2025 yıllık üretim verileri referans alınarak yapılan sapma analizinde, simülasyon yazılımları arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. HelioScope tüm tesislerde pozitif sapma üretmiş ve evirici verilerine kıyasla sistematik olarak daha yüksek üretim tahmininde bulunmuştur. Bu durum, yazılımın detaylı saha modellemesi ve kayıp parametrelerinin kullanıcı tarafından tanımlanmasına imkân vermesi nedeniyle daha iyimser sonuçlar üretmesiyle ilişkilendirilebilir. GSA sonuçları ise bazı tesislerde evirici verilerine oldukça yakın değerler sunmuş; özellikle Gündoğdu-2 tesisinde sapma oranı ihmal edilebilir seviyede gerçekleşmiştir. PVGIS ise bazı tesislerde temkinli tahminler üretmiş, Erko-1 tesisinde ise belirgin negatif sapma göstermiştir. Küçük ölçekli tesislerde (Aktaş-1 ve Ç. Kardeşler) sapma oranlarının daha yüksek çıkması, saha koşullarına bağlı kayıpların ve gerçek işletme parametrelerinin simülasyon varsayımlarından farklılaşabileceğini göstermektedir. Çizelge 5’te evirici 2025 yıllık üretim değerlerini referans alarak sapma oranları verilmiştir.

Çizelge 5. Tesislerin Sapma Oranları

Tesis Adı (GES)	HelioScope	GSA	PVGIS
Aktaş-1	+23,98 %	+11,23 %	+9,29 %
Erko-1	+9,33 %	-2,04 %	-21,93 %
Ç. Kardeşler	+26,00 %	+20,96 %	+13,29 %
Gündoğdu-2	+19,05 %	-0,12 %	-4,97 %
Anonim-1	+9,19 %	+2,87 %	+3,31 %

Elde edilen bulgular, simülasyon yazılımlarının yıllık üretim tahminlerinde genel olarak kabul edilebilir doğruluk seviyelerinde sonuç verdiğini; ancak yazılımların modelleme yaklaşımı ve veri tabanı farklılıklarına bağlı olarak sistematik sapmalar oluşabildiğini göstermektedir. Bu nedenle yatırım ve performans değerlendirme süreçlerinde simülasyon sonuçlarının tek başına yeterli olmayacağı, gerçek evirici verileri ile doğrulanmasının teknik açıdan gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, HelioScope'un sunduğu özelleştirilmiş parametre seçimi teknik bir üstünlük sağlasa da sahadaki gerçek üretimi temsil eden evirici verilerinin genellikle muhafazakâr PVGIS ile iyimser HelioScope arasında bir denge noktasında ve GSA'ya çok yakın konumlandığı söylenebilir.

KAYNAKÇA

- Acar, S. ve Köseoğlu, H., Jeotermal Suların Uygulama Alanları ve Çevresel Problemler, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Kasım, Özel Sayı 28, 325-332, 2021.
- Akarsu, E., Çatı Tipi Güneş Enerji Santralinin Üretim ve Simülasyon Verilerinin Karşılaştırılması: Antalya İli Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, 2025.
- Arı, F. ve Yılmaz, V., Türkiye’de ve Dünya’da Enerji Kaynaklarının Genel Görünümü ve Alternatif Enerji Kaynaklarının Önemi, Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Aralık, 34, 496-519, 2023.
- Aurora Solar, HelioScope Solar Design Software, Aurora Solar Inc., San Francisco.
- Bayraç, H.N. ve Özarslan, B., Biyokütle Enerjisi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkinin Ampirik Bir Analizi: Türkiye Örneği, Yalova Sosyal Bilimler Dergisi, Ekim, 8(17), 1-17, 2018.
- Bodur, G. ve Şenyuva, E., Üniversite Öğrencilerinin Hidroelektrik Enerji Santrallerine (HES) İlişkin Görüşleri ile Çevreye Yönelik Tutumları Arasındaki İlişki, Cumhuriyet International Journal of Education, Cilt 2, Sayı 4, 27–38, 2013.

- Demir, M., Kars İlinin Biyokütle Enerji Potansiyeli ve Kullanılabilirliği, Türk Coğrafya Dergisi, Haziran, 68, 31-41, 2017.
- Duffie, J. A. ve Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition, Wiley, New York, 2013.
- Dündar, H. K., & Şeker, M., Feasibility analysis of rooftop solar PV systems on a university campus: A case study of Sivas Cumhuriyet University. Journal of Engineering Faculty, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2025.
- Ember, Türkiye Surpasses 2025 Solar Target as Capacity Doubles in 2.5 Years, Ember Climate, London, 2025.
- Energy Institute (EI), Statistical Review of World Energy: 2025, 74th Edition, Energy Institute, London, 2025.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik Üretim ve Tüketiminde Rekor, 2026.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Güneş Enerjisi Bilgi Merkezi, Ankara.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA), Ankara.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Ulusal Enerji Planı (2020-2035), Ankara, 2022.
- ESMAP, Global Photovoltaic Power Potential by Country, World Bank Group, Washington DC, 2020.
- European Commission – Joint Research Centre, PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System, European Commission, 2024.
- Görcelioğlu, E., Güneş Açılımları ve Bunların Peyzaj Düzenlemelerindeki Önemi, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi Seri B, Haziran, 36(3), 33-52, 1987.
- Gümüş, B.S., Güneş Kapasitesi 2,5 Yılda İki Katına Çıkararak 2025 Hedefini Aştı, Ember Enerji Analizi, Ocak, 2025.
- Güner, E.D., Tekin, S., Çilek, A. ve Ünal Çilek, M., Güneş Enerjisi Santrali için Uygun Alanların CBS Tabanlı AHP Yöntemi ile Belirlenmesi: Mersin İli Örneği, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Mart, 36(1), 11–24, 2021.
- IEA, Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028, IEA Publications, Ocak, 2024.
- IRENA, Renewable Capacity Statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024.
- İnce, İ.T., Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretiminde Örnek Uygulamalar, Disiplinlerarası Yenilik Araştırmaları Dergisi, Nisan, 1(1), 1-10, 2021.

- İzgi, E., & Özcan, Ö., Şebekeye bağlı fotovoltaik çatı sisteminin karşılaştırmalı performans analizi. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi (KSU Journal of Engineering Sciences), 23(3), 2020.
- Jacobson, M. Z., Fundamentals of Atmospheric Modeling, Cambridge University Press, 2005.
- Kabakcı, M. ve Eke, R., Seasonal Variation of the Spectral Irradiance for the Province of Muğla, Muğla Journal of Science and Technology, Ekim, 4(2), 231-235, 2018.
- Kayıoğlu, B. ve Diken, B., Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kullanımının Mevcut Durumu ve Sorunları, Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, Haziran, 15(2), 61-65, 2019.
- Kaysal, K. ve Hocaoglu, F.O., Modelling of Different Mother Wavelet Transforms with Artificial Neural Networks for Estimation of Solar Radiation, Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering, 24(2), 141-154, 2023.
- Kılıç, F.Ç., Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, Mühendis ve Makina, Aralık, 56(671), 28-40, 2015.
- Kocalmış Bilhan, A. ve Emikönel, S., Nevşehir İli Güneş Enerji Potansiyelinin Analizi ve Kurulu Güneş Enerji Santralleri, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Nisan, Özel Sayı 24, 289-294, 2021.
- Kozak, M., Denizli İli Jeotermal Enerji Kaynakları ve Kullanım Alanlarının Araştırılması, YEKARUM e-DERGİ, Haziran, 5(1), 1-11, 2020.
- Külekçi, Ö.C., Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, Aralık, 1(2), 83-91, 2009.
- Oral, F. ve Behçet, R., Rüzgâr Verilerinin Enerji Üretimi Amaçlı Değerlendirilmesi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Aralık, 4(2), 173-182, 2015.
- Özbay, H. ve Karafıl, A., Bilecik İli için Güneş Enerji Santrali Maliyet Analizi, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, Kasım, 6(2), 497-508, 2019.
- Öztürk, H.H., Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler, EMO Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 2017.
- REN21, Renewables 2023 Global Status Report: Global Overview, REN21 Secretariat, Paris, 2023.
- REN21, Solar PV, Renewables 2025 Global Status Report, REN21 Secretariat, Paris, 2025.
- Sayyadov, M., Günümüzde Enerji Politikaları ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Azerbaycan'da Yenilenebilir Enerji Sektörünün Gelişimi ve Rüzgar Enerji Türbini

- Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2023.
- Şahin, Z. R., & Salihmuhsin, M., Gerçekten sanala: 1 MWp güneş santralinin PVsyst simülasyon programıyla performans analizi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 203–215, 2024.
- Şencan, D., Yenilenebilir Enerjide Türkiye'nin Dünyadaki Yeri ve Uygulanan Teşviklerin Değerlendirilmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Temmuz, 15(3), 693-709, 2022.
- Taghiyev, A., Enerji Santrallerinin Sosyo-Ekonomik Yararları ve Doğaya Verdiği Zararların Karşılaştırılmalı Analizi: Neom Şehir Projesi Örneği, Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi, Ekim, 6(3), 610-625, 2023.
- Tanış, Z., & Altıntaş, N., Elâzığ ilinde şebekeye bağlı 1036,8 kWp fotovoltaik güneş enerjisi santralının ölçülen ve simüle edilen performans verilerinin analizi. EMO Bilimsel Dergi, 13(2), 2023.
- Taşkın, O. ve Korucu, T., Kahramanmaraş İli Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Kullanım Olanakları, KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, Aralık, 17(4), 12-16, 2014.
- Uğurlu, Ö., Türkiye’de Çevresel Güvenlik Bağlamında Sürdürülebilir Enerji Politikaları, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2006.
- Üründü, M. E., Şebekeye bağlı 1 MW kurulu güçteki güneş enerji santralının PVsyst ve PVSol ile performans analizi (Yüksek lisans tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2025.
- Vaziri, R., Solar Energy in Kurdistan, Iraq: A Comprehensive Review of Economic and Environmental Implications, Policies, and Advancements, International Journal of Kurdish Studies, Mart, 10(1), 47-74, 2024.
- World Bank Group, ESMAP ve Solargis, Global Photovoltaic Power Potential by Country, Global Solar Atlas, Washington DC, 2020.
- World Bank Group, ESMAP ve Solargis, Global Solar Atlas – Solar Resource Map, Washington DC, 2024.
- Yağlı, H., & Koç, Y., Gaziantep bölgesi için güneş enerjisinden elektrik üretiminde kurulacak panellerin optimum eğim açılarının belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (19), 475–483, 2020.
- Yıldız, Ö.F., Yılmaz, M., Çelik, A. ve İmik, E., Havalimanlarında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması, Journal of Aviation, Haziran, 4(1), 162-174, 2020.

Yılmaz, M. (2024). Elektroeğirme yöntemiyle fotovoltaiik panellerde verim artırıcı kaplamalar (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

SYNTHESIS OF MOFS@COTTON MATERIALS AS PHOTOCATALYST

Dr., Gizem Saygı

İzmir Institute of Technology,

gizemsaygi@iyte.edu.tr- 0000-0002-6146-9588

Prof. Dr., Fehime Çakıcıoğlu Özkan

İzmir Institute of Technology,

fehimeozkan@iyte.edu.tr- 0000-0003-3991-7652

ABSTRACT

Metal organic frameworks (MOFs), a prominent class of porous crystal structures, have attracted interest for the considerations of sustainable energy and environmental remediation. MOFs has exhibited photocatalytic properties due to highly crystalline porous networks, very large surface area, doping with heteroatoms, adjustable pore size, tailored structures with ease, high pore volume, and very low density. However, the application of the Ti- and Zn- based MOFs as photocatalysts has been limited in literature yet.

In the present study, Ti- and Zn- based MOFs (Ti-TPA and Zn-TPA) photocatalysts were synthesized and immobilized on the cotton fabric as a functional porous support material to simple use in photoreactors and increasing the adsorption ability of target pollutants. The synthesized photocatalysts were characterized by the ATR-IR, SEM and BET analyses. The existence of the strong (28.75 wt%) Zn peaks have been observed by SEM-EDX analysis for the Zn-TPA@ cotton material. The surface of Ti-TPA@ cotton includes the % 5.05 wt of Ti measured by the EDX analysis. The novel Zn-TPA@ cotton and Ti-TPA@ cotton composite photocatalysts are expected to exhibit high photocatalytic performance.

Keywords: metal organic framework, photocatalyst coating, cotton fabric, titanium dioxide

INTRODUCTION

Metal organic frameworks (MOFs), appearing as a hybrid porous material with many ideal properties combining organic ligands with metal ions, open a new perspective to reach optimized capability for the environmental remediation as photocatalyst. MOFs provide superior specific surface area, and large volumes, including highly interconnected 3D open cavities, allowing light to easily penetrate, enhancing light-harvesting efficiency, rising the accessibility of the active sites for reactant pollutants [1]. Nevertheless, the application of MOFs as photocatalyst is still limited.

MOFs such as Ti-TPA and Zn-TPA are excellent adsorbents and efficient photocatalysts, however, they present in powder form, which causes them to make it difficult to use in practical applications. Powder form of Ti-TPA and Zn-TPA could cause easy agglomeration and many separation adversities. Thereof, it is necessary to immobilize Ti-TPA and Zn-TPA on support materials. The deposition of MOFs on the support materials such as cotton fabric, zeolites, pulp and carbon materials ensure significant functions of composites, i.e. increasing adsorption ability and improving photocatalytic activities.

The aim of the study is to synthesize the novel Ti- and Zn- based MOFs photocatalysts to use in environmental remediation. The Ti-based MOF (Ti-TPA) and Zn-based MOF (Zn-TPA) photocatalysts were deposited on the porous support material like cotton fabric. The immobilization success has been proven by ATR-IR, SEM and EDX analysis.

MATERIALS AND METHODS

Synthesis of Ti- and Zn- based MOFs

Synthesis of Ti-TPA: Terephthalic acid (TPA) was dissolved in DMF:MeOH mixture and titanium isopropoxide were added and stirred. The solution was reacted at 120 °C during 3 days in autoclave. The obtained Ti-TPA was centrifuged, and solids were washed with the solvent three times. Afterthat, Ti-TPA was dried at vacuum.

Synthesis of Zn-TPA: TPA and zinc acetate were dissolved in DMF and stirred for 30 minutes. The reaction was carried out at 120 °C in reactor. The solution was centrifuged and solids were washed by stirring with DMF. By using soxhlet system, solids washed with methanol. Then, Zn-TPA was dried at vacuum.

Coating of Ti-TPA and Zn-TPA on cotton fabric by layer-by-layer method

Carboxymethylated cotton fabric was prepared by using the method proposed by Rubin et al [2]. Ti-TPA and Zn-TPA were deposited on the carboxymethylated cotton by layer-by-layer coating. The metal and ligand solutions were prepared separately. For Zn-TPA coating, zinc-containing solution was prepared using DMF and zinc acetate. Ligand-containing solution was arranged using TPA and DMF. The carboxymethylated cotton fabric was dipped into these

solutions consecutively. After coating, the cotton was washed with ethanol. Ti-TPA and Zn-TPA coated cottons were entitled as Ti-TPA@cotton and Zn-TPA@cotton, respectively.

RESULT AND DISCUSSION

Characterization of the MOFs@cotton Materials

Carboxymethylation of cotton was verified by comparing raw and the carboxymethylated fabrics using ATR-IR spectroscopy. The peak at 1630 cm^{-1} demonstrates the presence of the C=O bond at the carboxymethylation fabric. The intensity of OH at 3370 cm^{-1} is decreased due to the carboxylation [2].

The relation between Ti-TPA and Zn-TPA and carboxymethylated cotton was investigated by ATR-IR analysis (Figure 1-2). The ATR-IR spectrum of cotton fibers indicated characteristic bands at about $3370\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ (due to -OH stretching), $1500\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ (due to C–H vibration) and $1300\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ (due to C–O vibration) [3]. The bands were also shown in Ti-TPA@cotton and Zn-TPA@cotton materials. Carboxymethylation and deposition of the fibers could not to disappear of the characteristic peaks.

The ATR-IR spectra of Ti-TPA and Ti-TPA@cotton demonstrated that Ti-TPA had the peak at the $400\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ ascribed to Ti-OC vibration [4], which have not shown in Ti-TPA@cotton spectra (Figure 1).

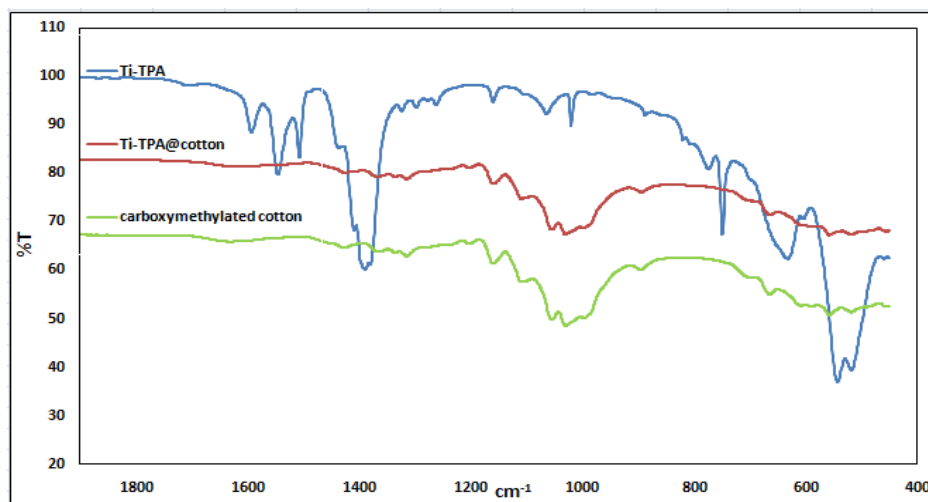


Figure 1. ATR-IR spectra of Ti-TPA, the carboxymethylated cotton and Ti-TPA deposited cotton

The ATR-IR spectra of Zn-TPA and Zn-TPA@cotton were shown in Figure 2. The asymmetric stretching of carboxylic acid in TPA was proven with the peaks of 1501 and 1575 cm^{-1} , while the symmetrical stretching was proven with peaks at 1379 cm^{-1} . The peaks at $800\text{--}750\text{ cm}^{-1}$ showed that 1,4-substitution of phenyl ring is emphasised with two out of aromatic C-H plane [5]. All these peaks in IR spectra of Zn-TPA and Zn-TPA@cotton indicated successful coating of the Zn-TPA onto the cotton fabric.

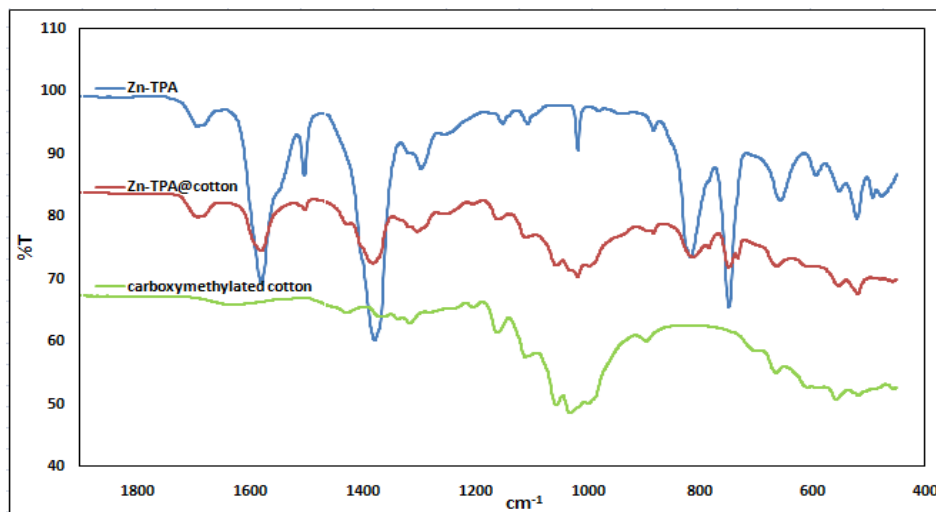


Figure 2. ATR-IR spectra of Zn-TPA, the carboxymethylated cotton and Zn-TPA deposited cotton

The surface morphology of Ti-TPA@ cotton and Zn-TPA@ cotton was investigated by SEM and the results were shown in Figure 3. Figure 3 showed that the fiber surfaces of raw cotton fabric were smooth. After deposition steps, Ti-TPA and Zn-TPA covered the cotton surface (Figure 3b, 3c)

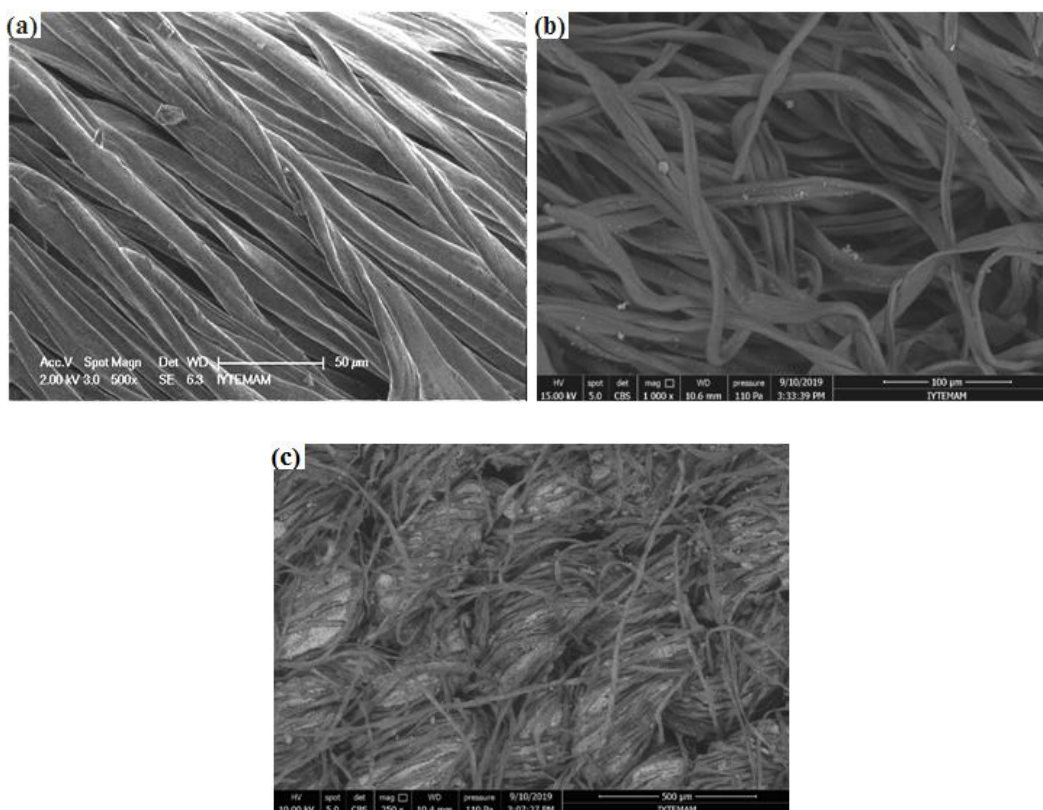


Figure 3. SEM images of a) raw cotton, b) Ti-TPA@ cotton and c) Zn-TPA@ cotton

According to SEM-EDX results (Figure 4-5), the major components were C, O and Al for both MOFs deposited on fibers. Additionally, the existence of the metal ion was based on the

deposited materials. When the fabric was coated with Ti-TPA, some nanoparticles that contain Ti were observed on cotton surface (Figure 4). Although IR could not prove the deposition of the Ti-TPA on cotton, there were Ti-based components covering the cotton fibers and the surface enclosed the % 5.05 wt of Ti characterized by the EDX.

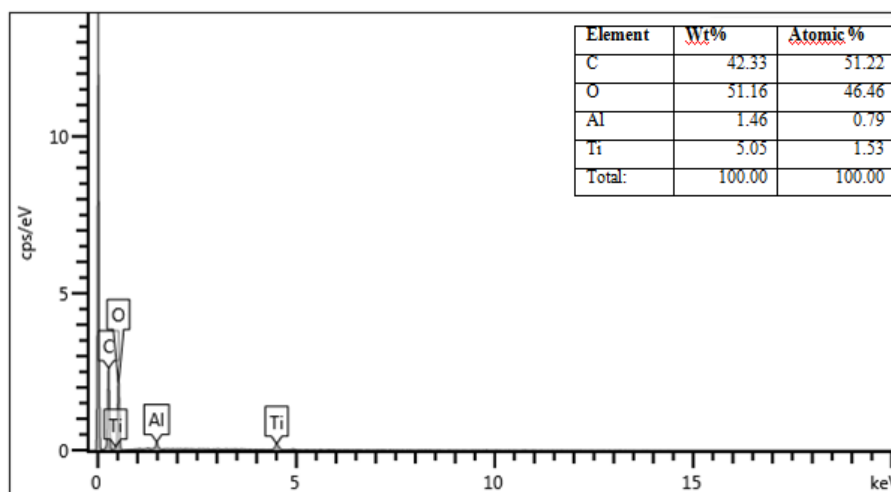


Figure 4. SEM-EDX results of Ti-TPA@ cotton

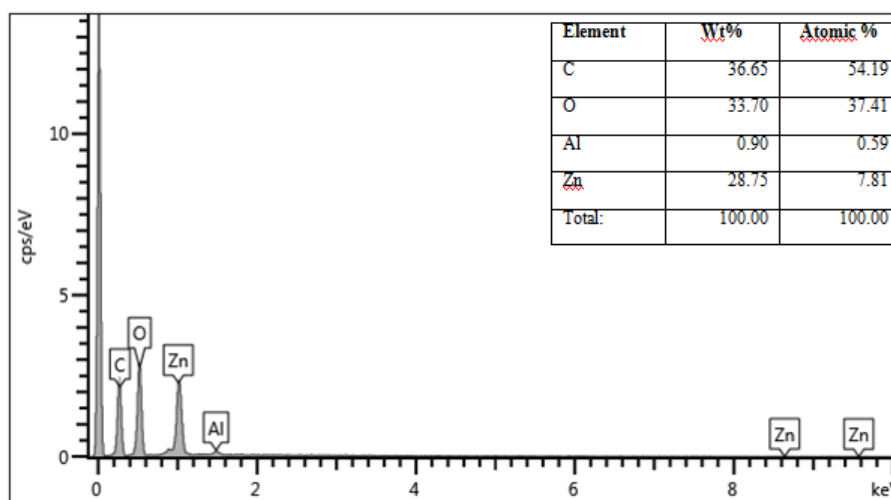


Figure 5. SEM-EDX results of Zn-TPA@ cotton

Figure 3c demonstrated that Zn-TPA was collected around the cotton fibers almost homogenously. In addition, the appearance of the main Zn peaks (Figure 5) was monitored by EDX analysis (28.75 wt%).

CONCLUSION

The synthesis of the Ti- and Zn- based MOFs was performed successfully. Then the deposition of Ti- and Zn- based MOFs on the cotton fiber were accomplished to use as a novel photocatalyst. The chemical surface modification of cotton was essential to gain efficient coverage of MOFs. Thereof, the cotton fabrics were carboxymethylated by using the sodium

chloroacetate existence of sodium hydroxide to get more carboxyl groups for better deposition of Ti-TPA and Zn-TPA on the cotton. Then, layer by layer method was utilized to coat Ti-TPA and Zn-TPA on the cotton. Especially, Zn-TPA was immobilized successfully on the cotton fiber surface. The SEM images of Zn-TPA@ cotton exhibited regularly distributed MOF coating on cotton.

REFERENCES

1. Yao, P., Liu, H., Wang, D., Chen, J., Li, G., An, T.: Enhanced visible-light photocatalytic activity to volatile organic compounds degradation and deactivation resistance mechanism of titania confined inside a metal-organic framework. *J. Colloid Interface Sci.* 522, 174–182 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.03.075>
2. Rubin, H.N., Neufeld, B.H., Reynolds, M.M.: Surface-Anchored Metal-Organic Framework-Cotton Material for Tunable Antibacterial Copper Delivery. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 10, 15189–15199 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsami.7b19455>
3. Jia, M., Zhang, X.F., Feng, Y., Zhou, Y., Yao, J.: In-situ growing ZIF-8 on cellulose nanofibers to form gas separation membrane for CO₂ separation. *J. Memb. Sci.* 595, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117579>
4. Han, X., Yang, X., Liu, G., Li, Z., Shao, L.: Boosting visible light photocatalytic activity via impregnation-induced RhB-sensitized MIL-125(Ti). *Chemical Engineering Research and Design.* 143, 90–99 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.01.010>
5. Yang, H.M., Liu, X., Song, X.L., Yang, T.L., Liang, Z.H., Fan, C.M.: In situ electrochemical synthesis of MOF-5 and its application in improving photocatalytic activity of BiOBr. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition).* 25, 3987–3994 (2015). [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)64047-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)64047-X)

NANO PEKTİNİN YAPISAL, KOLLOİDAL VE FOTO-DUYARLI MIS ARAYÜZEY DAVRANIŞININ ÇOK YÖNLÜ KARAKTERİZASYONU

YASEMİN ERHAN

Batman Üniversitesi,

sinemmm_yasmin@hotmail.com- 0009-0003-2929-9886

Prof. Dr. OSMAN PAKMA

Batman Üniversitesi,

opakma@gmail.com- 0000-0002-3098-0973

Prof. Dr. İ. AFŞİN KARİPER

Erciyes Üniversitesi,

akariper@gmail.com- 0000-0001-9127-301X

ÖZET

Bu çalışmada nano pektinin yapısal, morfolojik, kolloidal, optik ve elektriksel özellikleri bütüncül bir yaklaşımla incelenmiş ve Al/NP/p-Si hibrit MIS yapısındaki arayüzey davranışı değerlendirilmiştir. FTIR analizleri, pektinin α -(1→4)-D-galakturonan omurgasını, belirgin –OH ve –COO⁻ fonksiyonel gruplarını ve kısmi esterleşme karakterini doğrulamıştır. EDX sonuçları, baskın C ve O içeriğine ek olarak önemli miktarda Na varlığını ortaya koyarak polianyonik yapıyı desteklemiştir. SEM görüntüleri amorf, tabakalı ve heterojen bir morfoloji gösterirken, DLS ölçümleri 32–258 nm aralığında çift modlu dağılım ve ortalama 109 nm hidrodinamik boyut sergilemiştir. Zeta potansiyelinin –18.1 mV olması, negatif yüzey yükünü ve kolloidal kararlılığı doğrulamaktadır. UV–Vis analizleri, nano pektinin geniş bant aralıklı ve optik olarak şeffaf bir biyopolimer olduğunu göstermiştir. Al/NP/p-Si yapısında elde edilen frekans bağımlı C–V ve G/–V karakteristikleri, belirgin arayüzey durum yoğunluğu, Maxwell–Wagner tipi ara yüzey polarizasyonu ve dipolar relaksasyon süreçlerine işaret etmektedir. Işık altında gözlenen kapasitans artışı, hump oluşumu ve tükenim bölgesi kaymaları, foto-indüklenmiş arayüzey yük modülasyonu ile ilişkilendirilmiştir. Elde edilen bulgular, nano pektinin yalnızca bir biyopolimer değil; yük depolama, foto-duyarlı dielektrik ve sensör arayüzeyi olarak kullanılabilecek fonksiyonel bir organik-dielektrik malzeme olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler : Nano pektin; MIS yapısı; Foto-duyarlı arayüzey.

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM VE SATHİ KAPLAMANIN FAYDA–MALİYET ANALİZLERİYLE ÖRNEK BİR YOL KESİMİ ÜZERİNDEN KARŞILAŞTIRILMASI

SUDE ÖZALTIN

İstanbul Nişantaşı Üniversitesi,
sudeozaltin@outlook.com - 0009-0002-6276-9555

Dr. Öğr. Üyesi GÖZDE SEZGİN TUNÇAY

İstanbul Nişantaşı Üniversitesi,
gozdesezgin.tuncay@nisantasi.edu.tr - 0009-0007-5305-8918

ÖZET

Karayolu üstyapıları, hizmet ömrü, sürüş güvenliği, kullanıcı konforu ve bakım maliyetleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle kırsal yol ağlarında sınırlı bütçeler ve görece düşük trafik hacimleri, kaplama türü seçiminde teknik performansın yanı sıra ekonomik sürdürülebilirliğin de dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, Yunak–Piribeyli yolu örneği üzerinden sathi kaplama ve bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama alternatifleri başlangıç yatırım maliyeti, iklimsel değerlendirmeler, sürüş konforu, hizmet ömrü, trafik hacmi ve yapısal performans açısından karşılaştırılmıştır. Maliyet analizinde yol geometrisi sabit tutulmuş; yalnızca kaplama türüne bağlı üstyapı tabakaları, malzeme miktarları ve birim maliyetler dikkate alınmıştır. Aynı zamanda yol kesiminin bulunduğu iklimsel koşullar ile yıllık ortalama günlük trafik (YOGT) verileri, kaplama performansı ve maliyet hesaplarına girdi olarak kullanılmıştır.

Mevcut durumda sathi kaplama bulunan yol için yapılan maliyet analizleri, bu kaplama türünün düşük ilk yatırım maliyeti sunduğunu ancak hizmet ömrü, sürüş konforu ve bölgenin iklim koşullarına karşı bozulma direnci açısından sınırlı performans sağladığını göstermiştir. BSK kaplama senaryosu ise MNPAVE yazılımı kullanılarak yapısal performans açısından değerlendirilmiş ve tekerlek izi oluşumunun yaklaşık bir yıl, yorulma çatlağı açısından ise yaklaşık on iki yıl içinde kritik seviyelere ulaşabileceği belirlenmiştir. Bulgular, Yunak-Piribeyli yolu kapsamında, BSK kaplamanın yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen mevcut trafik ve zemin koşulları altında beklenen performansı sürdürülebilir biçimde sağlayamadığını ve tasarım ömrü boyunca bakım ve rehabilitasyon gereksiniminin kaçınılmaz olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle kaplama türü seçiminin yalnızca ilk yatırım maliyetine değil, performans ve yaşam döngüsü maliyetlerine dayalı bütüncül bir değerlendirme ile yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Karayolu, Sathi Kaplama, Bitümlü Sıcak Karışım, Fayda–Maliyet Analizi, Yapısal Performans

1975 ÖNCESİ İNŞA EDİLEN BETONARME BİR YAPININ FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Prof. Dr. Ercan IŞIK

Bitlis Eren Üniversitesi,

eisik@beu.edu.tr - 0000-0001-8057-065X

Doç. Dr. Fatih AVCİL

Bitlis Eren Üniversitesi,

favcil@beu.edu.tr - 0000-0001-6550-550X

Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAC

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,

absarac@comu.edu.tr -0000-0002-4279-4158

ÖZET

06 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen ve asrın felaketi olarak adlandırılan depremler, 11 ilde farklı taşıyıcı sistemlere sahip çok sayıda yapıda tam göçme ya da değişen derecelerde yapısal hasar meydana getirmiştir. Yapısal yıkım ve hasarlarda, 2000 yılı öncesi inşa edilen yapılar ön plana çıkmıştır. Yapım yılının etkisini göstermek adına bu çalışma kapsamında, 1975 yılından önce güncel olarak kullanılan ve geçerli olan 1968-Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'teki minimum taşıyıcı eleman boyutları dikkate alınarak 5 katlı betonarme bir yapı modeli oluşturulmuş ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonucunda, kesme kuvvet kapasitesi aşılacak kolonlara lifli polimer (FRP) uygulaması yapılarak, güçlendirilmiş yapı için sayısal analizler tekrarlanmıştır. Güçlendirilen yapıda kesme kuvvet aşımı meydana gelmemiştir. Bu da özellikle eski mevcut yapı stokunda uygun güçlendirme uygulamalarının taşıyıcı sistemin sismik performansına katkısını bir kez daha ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Kahramanmaraş, FRP, betonarme, güçlendirme

1. GİRİŞ

06 Şubat 2023 tarihinde, yerel saatle 04:17 ve 13:24'te merkez üsleri Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçeleri olan, birbirinden farklı iki büyük deprem meydana gelmiştir. Literatürde "asrın felaketi" olarak nitelendirilen bu sismik olaylar, modern aletsel dönemde kaydedilen en yüksek can ve mal kayıplarına yol açan afetler olarak tarihe geçmiştir. Geniş bir coğrafi alana yayılan ve 11 ili doğrudan etkileyen bu depremler neticesinde; betonarme, yığma ve çelik gibi farklı taşıyıcı sistemlere sahip çok sayıda yapıda toptan göçme, ağır hasar ve çeşitli düzeylerde yapısal deformasyonlar gözlemlenmiştir. Söz konusu deprem serisini emsallerinden ayıran en temel özellikler; episantrların (merkez üslerinin) farklı lokasyonlarda fakat aynı bölge içerisinde olması, sarsıntıların kısa zaman aralıklarıyla tekrarlaması ve etkilediği bölgenin büyüklüğüdür. Bu faktörler, yapı stokundaki tahribatın şiddetini artırırken, arama-kurtarma ve lojistik süreçlerini de zorlaştırmıştır. Depremlerin yarattığı doğrudan fiziksel yıkımın yanı sıra; üretim hatlarının durması, altyapı tahribatı ve iş gücü kaybı gibi faktörler neticesinde ortaya çıkan makroekonomik ve ikincil dolaylı kayıplar da telafisi güç boyutlara ulaşmıştır [1,2,3,4,5,6].

Bu depremler, hakim kentsel yapı stoku olan betonarme yapılarda da çok büyük yıkım ve hasarlara neden olmuştur. Özellikle binaların yapım yılları hasarlarda kritik bir rol oynamıştır. Özellikle 2000 yılı önce inşa edilen yapılardaki yıkım ve hasar oranları daha fazla olmuştur [7,8,9]. Bu yıkımda yapısal düzensizlikler, depreme dayanıklı yapı tasarım ilkelerinin eksik, hatalı ve hiç uygulanmaması, düşük malzeme dayanımı, özellikle 2000 yılı öncesi yapı denetim sisteminin olmaması gibi faktörler kritik bir rol oynamıştır [10,11]. Özellikle eski deprem yönetmeliklerinde öngörülen düşük malzeme dayanımlarına göre inşa edilen yapılarda hasar düzeyi artış göstermiştir. Tüm bu sonuçlar mevcut yapı stokundaki 2000 yılı önce edilmiş yapılar ile ilgili alınacak kararların stratejik bir öneme sahip olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bu yapılar ile ilgili detaylı deprem performans analizlerinden sonra güçlendirme ve yıkım kararlarının alınması olası bir deprem öncesi alınabilecek önlemlerin başında gelecektir. Güçlendirme ile yapıların deprem performans düzeyleri öngörülen düzeye çekilerek olası yapısal hasarlarının önüne geçilmesi ve can kayıplarının minimize edilmesi sağlanabilir. Betonarme yapılarda farklı güçlendirme teknikleri kullanılabilmektedir. Bu yöntemlerden biri de taşıyıcı elemanlara lifli polimerlerin uygulanmasıdır.

Betonarme yapıların sismik performansını artırmak amacıyla uygulanan lifli polimer (FRP) kompozit sistemleri, yapı elemanlarının mekanik özelliklerini iyileştiren yüksek dayanımlı ve düşük ağırlıklı bir güçlendirme metodudur. Bu yöntemin temel amacı; özellikle süneklik kapasitesi yetersiz, korozyona uğramış veya tasarım yüklerinin ötesinde zorlanmaya maruz kalan yapısal elemanların moment, kesme ve eksenel yük taşıma kapasitelerini artırmaktır. Taşıyıcı sisteme katkısı bakımından lifli polimerler; kolonlarda oluşturdukları sargılama etkisiyle betonun basınç dayanımını ve şekil değiştirme kapasitesini belirgin şekilde yükseltirken, kiriş ve döşemelerde eğilme dayanımını takviye eder; ayrıca birleşim bölgelerinde gevrek kırılma modlarını engelleyerek yapının deprem enerjisini sönmüleme yeteneğini optimize eder. Korozyona karşı yüksek direnç göstermesi ve uygulama sırasında yapının kullanımını minimum düzeyde kısıtlaması, bu teknolojiyi modern mühendislik

uygulamalarında kritik bir rehabilitasyon stratejisi haline getirmektedir [12,13,14,15,6,17,18,19,20].

Bu çalışma kapsamında 2000 yılı öncesi yapıları temsil etmesi adına 1975 yılı öncesi yürürlükte olan 1968 deprem yönetmeliğindeki minimum malzeme dayanımları ile kolon ve kiriş en kesit koşulları dikkate alınarak 5 katlı betonarme bir yapı oluşturulmuştur. Statik itme analizi ile gerçekleştirilen yapısal analizlerden sonra kesme kuvvet kapasitesi aşılan kolonlar tespit edilmiştir. Aşım olan kolonlarda FRP uygulaması ile güçlendirme uygulaması gerçekleştirilerek sayısal analizler yenilenmiştir. Güçlendirme öncesi ve sonrası özellikle kesme kuvvet kapasitesi aşımının olup olmadığı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlanarak, öneriler yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

İnşaat teknolojisindeki ilerlemelere paralel olarak, sismik aktivitelerin yol açtığı kayıpları asgari düzeye indirmek amacıyla yapı tasarım ve uygulama standartları geliştirilmiş; bu normlar yönetmelikler aracılığıyla yasal bir statü kazanmıştır. Türkiye’de depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkeleri, tarihsel süreçte afet yönetmelikleri kapsamında düzenlenmiş olup, günümüze kadar on farklı revizyon aşamasından geçmiştir. Yürürlükte oldukları dönemlerde meydana gelen yıkıcı depremler, mevcut yönetmeliklerin performansını test etmiş ve ortaya çıkan yetersizlikler, bu metinlerin teknik tecrübeler ışığında sürekli olarak güncellenmesini veya yeniden kaleme alınmasını zorunlu kılmıştır. Gelişen mühendislik biliminin ve saha deneyimlerinin bir sonucu olarak modernizasyon sürecine tabi tutulan bu düzenlemeler, odağı her zaman deprem güvenliği olduğu için literatürde ve uygulamada "deprem yönetmelikleri" olarak adlandırılmaktadır [21,22]. Türkiye’de yürürlüğe girmiş olan deprem yönetmelikleri;

- ❖ 1940 – Zelzele Mıntıklarında Yapılacak İnşaata Ait İtalyan Yapı Talimatnamesi
- ❖ 1944 – Zelzele Mıntıklarında Muvakkat Yapı Talimatnamesi
- ❖ 1949 – Türkiye Yer Sarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği
- ❖ 1953 – Yersarsıntısı Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
- ❖ 1962 – Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
- ❖ 1968 – Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
- ❖ 1975 – Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
- ❖ 1998 - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
- ❖ 2007 – Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
- ❖ 2018 – Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

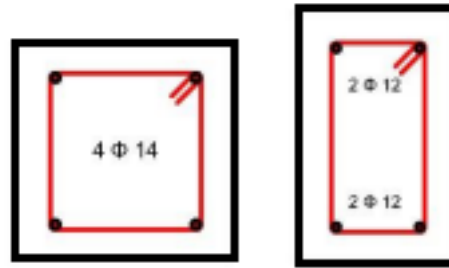
Bu çalışma kapsamında ABYYHY-1968’te öngörülen ve Çizelge 1’de gösterilen minimum kolon-kiriş en kesit koşulları ile malzeme sınıfları dikkate alınarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Dikkate alınan en kesit ve malzeme koşulları

Parametre	ABYYHY-1968
Beton	C12

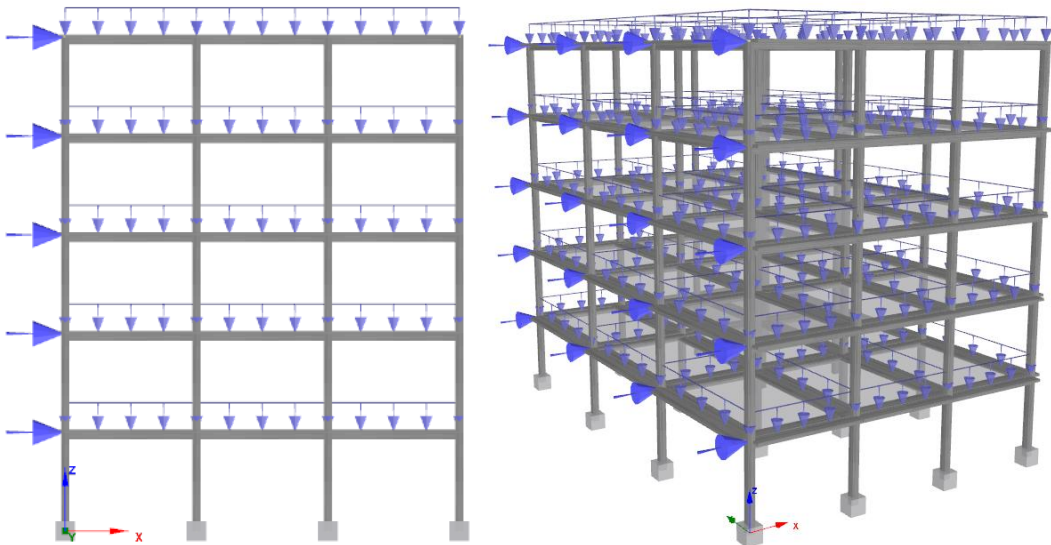
Donatı	S220
Kolonlar (mm)	250*250
Kirişler (mm)	150*300
Kiriş alt donatı	2 Φ 12
Kiriş üst donatı	2 Φ 12
Kolon boyuna donatı	4 Φ 14
Enine donatı	Φ 6/250

Kolon ve kirişlere ait minimum koşullar dikkate alınarak oluşturulan kolon ve kiriş en kesitleri Görsel 1’de gösterilmiştir.



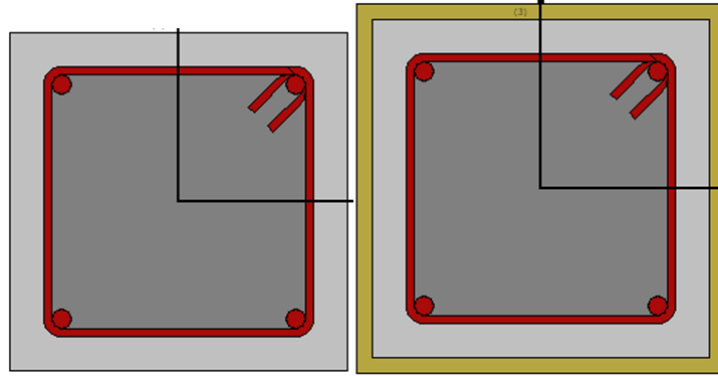
Görsel 1. Çalışmada dikkate alınan kolon ve kiriş en kesitleri

Bu çalışma kapsamında, orta yükseklikteki betonarme binaları temsil etmek adına 5 katlı betonarme bir yapı örneği dikkate alınmıştır. Malzeme olarak C12-S220 seçimi yapılan bina modelinde her bir kat yüksekliği 3m olarak dikkate alınmıştır. Yapıda herhangi bir düzensizlik bulunmamaktadır. Yapısal analizler Seismostruct [23] yazılımında yer alan statik itme analizi kullanılmıştır. Dikkate alınan yapısal model için elde edilen 2 ve 3 boyutlu modeller Görsel 2’de gösterilmiştir.



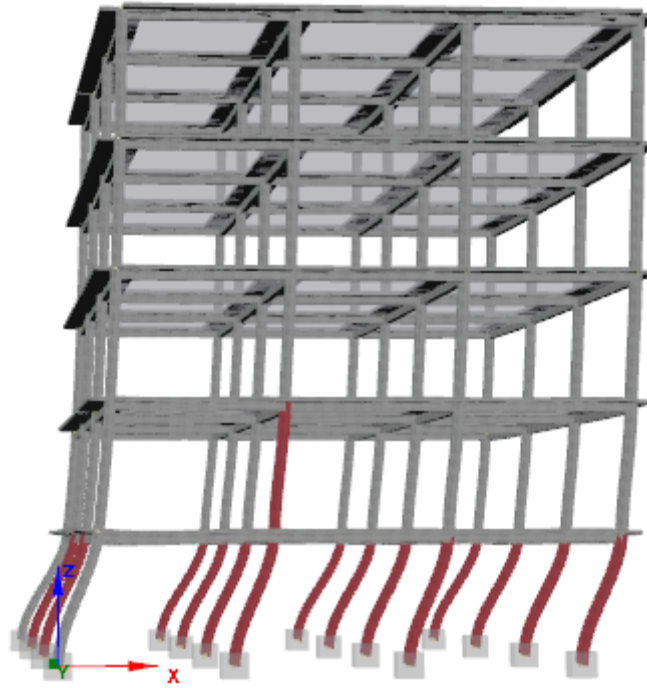
Görsel 2. Örnek BA yapı için 2 ve 3 boyutlu modeller

Bu çalışmada güçlendirme uygulamaları sadece kolonlara uygulanmıştır. Kolonlarda güçlendirme öncesi ve sonrası elde edilen kolon en kesitleri Görsel 3’te gösterilmiştir.



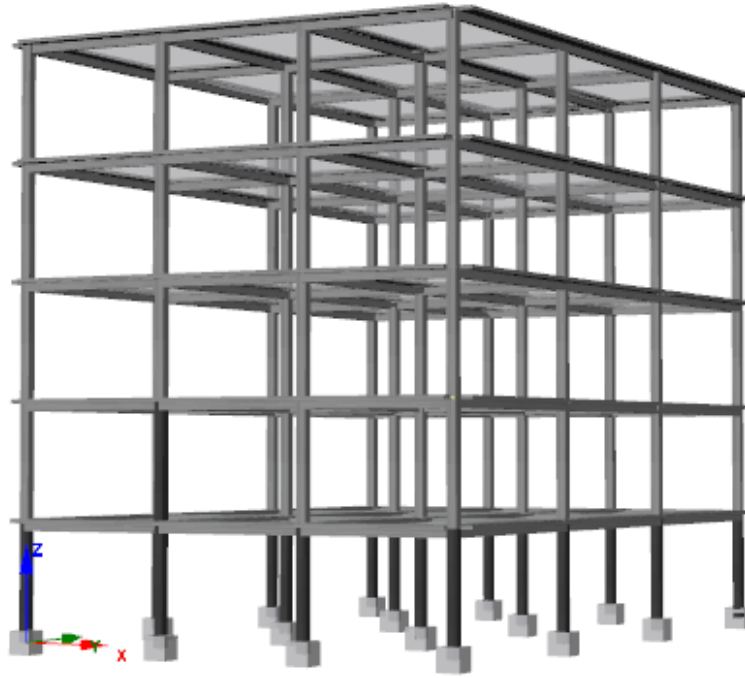
Görsel 3. Güçlendirme öncesi ve sonrası için kolon en kesitleri

Referans bina olarak modellenen ve ABYYHY-1968’deki minimum en kesit ve malzeme koşullara sahip 5 katlı betonarme yapı için elde edilen kesme kuvvet hasar durumu Görsel 4’te gösterilmiştir.



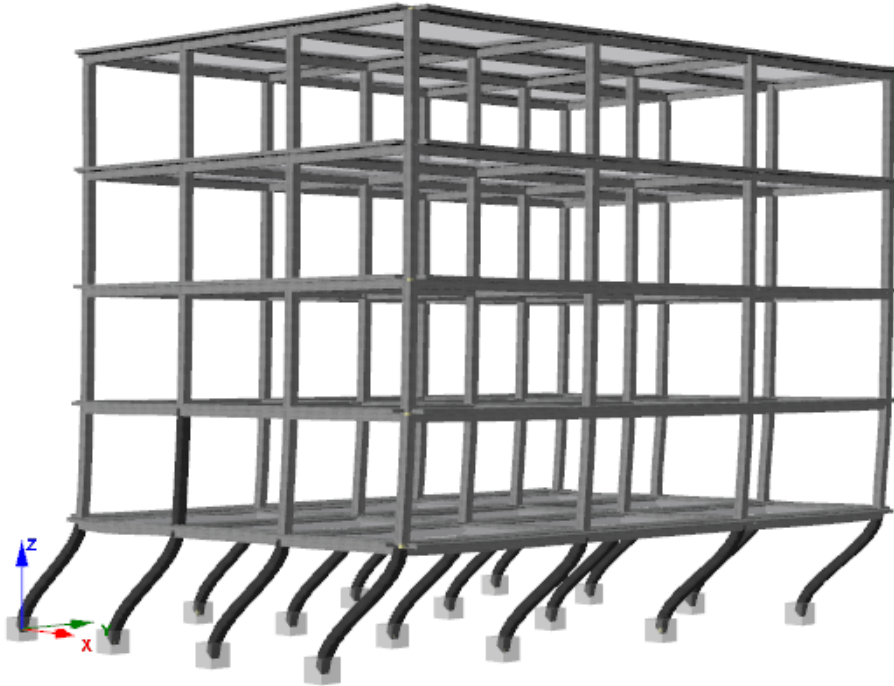
Görsel 4. Referans bina modeli için kesme kuvvet hasar durumu

Görsel 4’ten görüleceği üzere minimum koşullar dikkate alınarak herhangi bir yapısal düzensizlik içermeyen oluşturulan referans binada kesme kuvvet kapasitesi aşılacak bir çok kolon bulunmaktadır. Sadece kesme kuvvet kapasitesi aşılacak kolonlara FRP uygulaması yapılarak elde edilen üç boyutlu yapısal model Görsel 5’te gösterilmiştir. Siyah renkli kolonlara FRP uygulaması yapılmıştır.



Görsel 5. Güçlendirilen kolonlar için elde edilen üç boyutlu model

Güçlendirme sonrası elde edilen kesme kuvvet kapasitesi için elde edilen deformasyon durumu Görsel 6’da gösterilmiştir.



Görsel 6. Önerilen güçlendirme sonrası elde edilen kesme kuvvet için deformasyon durumu

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, 1975 yılı öncesi inşa edilen betonarme yapı stokunu temsil etmek üzere, 1968 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik’te [24]

öngörülen minimum malzeme dayanımları ve kesit koşulları dikkate alınarak modellenen 5 katlı betonarme bir yapının sismik performansı incelenmiştir. Statik itme analizi sonuçları, herhangi bir plan veya düşey düzensizlik içermemesine rağmen referans yapıda çok sayıda kolonda kesme kuvvet kapasitesinin aşıldığını ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle 2000 yılı öncesi betonarme yapılarda sıklıkla karşılaşılan yetersiz enine donatı düzeni, düşük beton dayanımı ve süneklik eksikliği gibi yapısal zafiyetlerin, göçme mekanizmasını hızlandıran kritik unsurlar olduğunu açıkça göstermektedir. Elde edilen bulgular, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde ağır hasar veya göçme yaşayan benzer yapı tipleriyle uyumlu sonuçlar sunmaktadır.

Kesme kuvvet kapasitesi yetersiz olan kolonlara lifli polimer (FRP) ile yapılan güçlendirme uygulaması sonrasında gerçekleştirilen sayısal analizler, güçlendirme müdahalesinin yapısal performans üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymuştur. FRP ile sarılan kolonlarda kesme kuvvet kapasitesinin aşıldığı herhangi bir duruma rastlanmamış, böylece gevrek kesme hasarlarının önüne geçilmiştir. Bu sonuç, FRP uygulamasının kolonlarda sargılama etkisi oluşturarak hem betonun basınç dayanımını hem de şekil değiştirme kapasitesini artırdığını; aynı zamanda kolon davranışını daha sünek bir mekanizmaya yönlendirdiğini göstermektedir. Güçlendirme sonrası elde edilen performans artışı, FRP'nin özellikle mevcut yapı stokunda hızlı, etkin ve müdahale seviyesi düşük bir güçlendirme yöntemi olarak uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, 1975 yılı öncesi betonarme yapılarda yalnızca yönetmeliklere uygun minimum kesit ve malzeme koşullarının sağlanmasının, güvenli bir deprem performansı için yeterli olmadığını; buna karşın, hedeflenen taşıyıcı elemanlara yönelik uygun FRP güçlendirme uygulamalarının yapının sismik davranışını anlamlı ölçüde iyileştirebildiğini ortaya koymuştur. Özellikle kesme hasarlarının önlenmesi açısından FRP ile kolon güçlendirmesinin, yıkım riskinin azaltılmasında kritik bir rol üstlendiği görülmektedir. Bu bağlamda, benzer özelliklere sahip mevcut yapıların detaylı performans analizleriyle değerlendirilmesi ve güçlendirme kararlarının eleman bazında verilmesi, olası depremler öncesinde can ve mal kayıplarının azaltılmasına yönelik etkili bir strateji olarak önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Bayraktar, A., Bayraktar, S., Núñez, T. R., Brzev, S., Ventura, C. E., Yang, T. Y., & Taş, Y. Seismic demand and performance for severely damaged low-rise buildings during the February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 203, 109999, 2026.
- [2] Aydın, M. C., Işık, E., Büyüksaraç, A., Ulu, A. E., & Avcil, F. Technical and socio-economic perspective on the disaster of the century (6 February 2023 earthquake) in Türkiye on the second anniversary, *Geological Journal*, 2025.
- [3] Büyüksaraç, A., Işık, E., Bektaş, Ö., & Avcil, F. Achieving intensity distributions of 6 February 2023 Kahramanmaraş (Türkiye) earthquakes from peak ground acceleration records, *Sustainability*, 16(2), 599, 2024.
- [4] Bilim, F., Koşaroğlu, S., & Aydemir, A. Relationship between crustal magnetic anomalies and earthquake activity in Malatya and surrounding region after the 2023

- Kahramanmaraş earthquakes, southeastern Türkiye, *Acta Geophysica*, 74(1), 48, 2026.
- [5] İnce, E. G., Çakıl, B., Şimşek, M., & İnce, O. Evaluation of ground motions and seismic performance of RC buildings after 2023 Kahramanmaraş earthquakes: design and construction deficiencies, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-28, 2025.
- [6] İnce, E. G. Seismic performance of RC buildings with one-way joist slab: Insights from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structural Concrete*, 2025.
- [7] Aras, F., Doğan, T. P., Öztürk, M., Tün, M., Işık, E., & Arslan, M. H. Assessment of the damage caused by the 6 February 2023 earthquakes on old and new dated reinforced concrete buildings in Elbistan, Turkey, *Advances in Structural Engineering*, 13694332251375194, 2025.
- [8] Peker, F. Ü., Yuzbasi, J., Işık, E., Büyüksaraç, A., & Avcil, F. Damage assessment, regional ground motion record evaluation, and seismic performance analysis of a high-rise 14-story dual system building after the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structures*, 80, 109897, 2025.
- [9] Işık, E., Shao, Y. B., Hadzima-Nyarko, M., Radu, D., Bulajić, B., & Lozančić, S. Enhancing the seismic safety of upgraded RC buildings using FRP retrofitting: analytical and field evidence from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-35, 2025.
- [10] Eren, M. E., & Fenerli, C. Seismic failure mechanism shift in RC buildings revealed by NDT-supported, field-calibrated BIM-based models, *Applied Sciences*, 16(1), 455, 2026.
- [11] Işık, E. Parameters in the rapid evaluation method in reinforced-concrete structures in the light of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Earthquakes and Structures*, 29(4), 269, 2025.
- [12] Işık, E., Radu, D., Harirchian, E., Avcil, F., Arkan, E., Büyüksaraç, A., & Hadzima-Nyarko, M. Failures in reinforced-concrete columns and proposals for reinforcement solutions: Insights from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Buildings*, 15(9), 1535, 2025.
- [13] Işık, E. A study on strengthening RC structural elements with fiber-based polymers, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 1269-1286, 2025.
- [14] Işık, E., Hadzima-Nyarko, M., Tayeh, B. A., Harrat, Z. R., Avcil, F., & Arkan, E. Comparison of reinforcement methods with advanced materials for RC columns, *Advanced Engineering Letters*, 4(1), 1-13, 2025.
- [15] Abdoli, M., & Mostofinejad, D. Shear-torsion interaction in FRP-strengthened RC members: Modeling, failure modes, and experimental correlation, *Construction and Building Materials*, 500, 144138, 2025.
- [16] Liu, Y., Hao, Y., Hao, H., & Zhou, Y. Fragility assessment of FRP-strengthened RC beams with chloride-induced corrosion damage under impact loads, *Reliability Engineering & System Safety*, 111728, 2025.
- [17] Zhang, S. S., Zhang, D. D., & Nie, X. F. Behavior of RC interior beam-to-column joints with FRP-strengthened beam web openings under cyclic loading, *Engineering Structures*, 324, 119373, 2025.
- [18] Dirar, S., Sogut, K., Caro, M., Rahman, R., Theofanous, M., & Faramarzi, A. Effect of shear span-to-effective depth ratio and FRP material type on the behaviour of RC T-beams strengthened in shear with embedded FRP bars, *Engineering Structures*, 332, 120105, 2025.

- [19] Sun, P. X., Bai, Y. L., & Peng, K. D. Behavior and analytical modelling of slender RC columns strengthened by LRS FRP under eccentric compression, *Journal of Building Engineering*, 114057, 2025.
- [20] Huang, C., Zhang, R., Zhang, J., Guo, X., Wei, P., Wang, L., & Wang, Y. A novel method for fatigue design of FRP-strengthened RC beams based on machine learning, *Composite Structures*, 359, 118867, 2025.
- [21] Alyamaç, K. E., & Erdoğan, A. S. Geçmişten günümüze afet yönetmelikleri ve uygulamada karşılaşılan tasarım hataları, *Deprem Sempozyumu, Kocaeli*, 707-715, 2005.
- [22] Işık, E. A comparative study on the structural performance of an RC building based on updated seismic design codes: Case of Turkey, *Challenge*, 7, 123-134, 2021.
- [23] Seismosoft. SeismoStruct 2025—A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, 2025. <http://www.seismosoft.com>
- [24] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1968), Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 1968.

**06 ŞUBAT 2023 DEPREMLERİNİN ARDINDAN MALATYA'DAKİ BETONARME
YAPILARIN YAPISAL DÜZENSİZLİKLER AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Fatih AVCİL

Bitlis Eren Üniversitesi,

favcil@beu.edu.tr - 0000-0001-6550-550X

Prof. Dr. Ercan IŞIK

Bitlis Eren Üniversitesi,

eisik@beu.edu.tr - 0000-0001-8057-065X

Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAC

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,

absarac@comu.edu.tr -0000-0002-4279-4158

ÖZET

Bu çalışma, betonarme taşıyıcı sistemlerde projelendirme ve uygulama safhalarındaki teknik eksikliklerin, yapısal kapasite üzerindeki yıkıcı etkilerini 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri özelinde irdelemektedir. Depreme dayanıklı tasarım ilkelerine uyulmaması, yapısal düzensizlikler, zayıf yerel zemin koşulları ve sismik yüklerin şiddeti gibi faktörlerin eş zamanlı etkileşimi, binalarda öngörülen taşıma limitlerinin aşılmasına ve neticesinde toptan, kısmi veya progresif göçmelere yol açmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Malatya ilinde söz konusu depremlerde ağır hasar almış veya tamamen yıkılmış on iki adet betonarme yapı seçilerek vaka analizi yöntemiyle incelenmiştir. Yapıların deprem öncesi durumları ile deprem sonrası görselleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Göçme veya hasar mekanizmalarını tetikleyen temel mühendislik hataları ve hasar gerekçeleri analitik bir yaklaşımla ortaya konulmuştur. Bu ampirik değerlendirme, mevcut yapı stokundaki kronik zafiyetlerin teşhis edilmesi ve gelecekteki sismik risklerin yönetilmesi açısından kritik veriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Göçme, Betonarme, Deprem, Düzensizlik, Malatya

1. GİRİŞ

Depremelerin arından meydana gelen yıkım ve farklı düzeylerdeki yapısal hasarlar, mevcut yapıların deprem performanslarının belirlenerek, yetersiz deprem performansına sahip yapılar ile ilgili gerekli kararların verilmesi, depreme dirençli kentlerin oluşmasında kritik bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Bu süreç, kentsel planlama ve sosyal hayatın sürdürülebilirliği açısından, modern afet yönetiminin mevcut yapılar ile ilgili alınabilecek önlemlerin ayrılmaz bir parçasıdır. Kentsel yapı stokunun temel bileşeni olan betonarme yapıların sismik karakteristikleri, zemin-yapı etkileşimi ve sismik aktivitenin büyüklüğü, meydana gelebilecek hasar spektrumunu belirleyen temel parametrelerdir. Nüfus yoğunluğunun büyük bir kısmını barındıran bu yapıların dinamik yükler altındaki yapısal davranışı, can güvenliğinin tesisi ve yapısal bütünlüğün korunması noktasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, binaların deprem dirençli tasarım normlarına uygun olarak projelendirilmesi ve inşa edilmesi, sismik performans seviyelerini doğrudan tayin etmektedir. Mevcut bilimsel ve teknolojik imkanlarla oluşma zamanı kestirilemeyen depremlerin yıkıcı etkilerini minimize edebilmek için, afet öncesi risk yönetimi ile afet sonrası iyileştirme süreçlerinin koordineli bir şekilde yürütülmesi bir gerekliliktir. Özellikle saha gözlemleri ve hasar tespit çalışmaları sonucunda elde edilen veriler; sismik risk modellerinin kalibre edilmesine, deprem tehlike haritalarının güncellenmesine ve yürürlükteki yapı yönetmeliklerinin ampirik bulgular ışığında daha güvenli hale getirilmesine temel teşkil etmektedir.

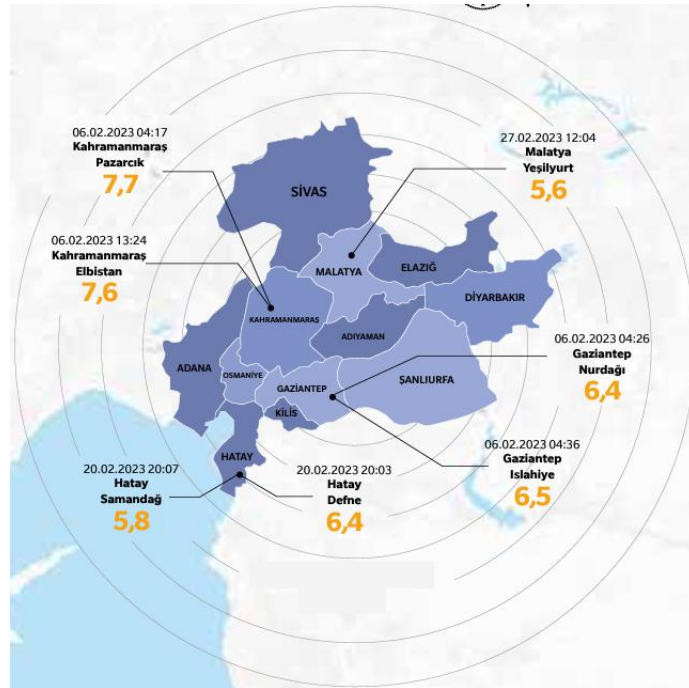
06 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli sismik olaylar, 11 ilde geniş çaplı bir yıkıma yol açarak yüz binlerce yapının işlevsiz hale gelmesine neden olmuştur. Bölgedeki kentsel dokunun ana gövdesini oluşturan betonarme sistemler, ağır yapısal deformasyonların yanı sıra yaygın olarak kısmi veya progresif göçme mekanizmalarına maruz kalmıştır. Deprem sonrası literatürde, bu hasar ve yıkımların nedenlerini araştıran çok sayıda bilimsel çalışma yayımlanmış; söz konusu araştırmalar, hasar oluşumlarını deprem ve inşaat mühendisliği prensipleri çerçevesinde analitik bir düzlemde irdlemiştir. Yapılan bu akademik değerlendirmeler sonucunda; betonarme elemanlardaki yapısal konfigürasyon hataları, standart altı malzeme dayanımları, deprem dirençli tasarım normlarına uyulmaması, hatalı projelendirme yaklaşımları ve elverişsiz yerel zemin parametrelerinin, gözlemlenen tahribatın birincil katalizörleri olduğu saptanmıştır [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15]. Bu tür ve benzeri çalışmalar, yapıların hasar durumlarının bilimsel yöntemlerle değerlendirilmesini sağlayarak, mühendislik disiplininde yapı güvenliği, dayanıklılık analizi ve risk yönetimi konularında bilgi üretimine katkıda bulunmaktadır. Aynı zamanda, elde edilen veriler ve geliştirilen yöntemler, uygulamada yapı stokunun güvenli hale getirilmesi, can kayıplarının önlenmesi ve kaynakların etkin kullanımı açısından kritik rol oynayacaktır. Bu tür çalışmalar, afet sonrası iyileştirme ve yeniden yapılandırma süreçlerinin etkinliğini artırarak toplumsal dirençliliğin geliştirilmesine de doğrudan katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin önemli etkiler yaptığı ve çok yüksek sismik riskli bir konumda bulunan Malatya ilinde yer alan ve depremlerde hasar alan veya yıkıma uğrayan on iki farklı betonarme yapı dikkate alınmıştır.

On iki farklı betonarme yapı için hasar görselleri, saha gözlemleri sonucu elde edilmiştir. Coğrafi konumları belirlenen bu yapılar için, Google Street uygulaması yardımı ile deprem öncesi görseller elde edilmiştir. Tüm bu yapıların deprem öncesi ve görselleri karşılaştırılarak hasar nedenleri yapısal düzensizlikler açısından ortaya konmaya çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Türkiye, 06 Şubat 2023 tarihinde ardışık ve sismolojik olarak birbirinden farklı iki büyük depremin neticesinde geniş ölçekli bir yapısal yıkım süreciyle karşı karşıya kalmıştır. Söz konusu depremler; sarsıntı şiddeti, kapsadığı coğrafi bölge ve tarihsel tekerrür periyotları açısından dünya üzerindeki majör sismik olaylar kategorisinde değerlendirilmektedir. Modern aletsel gözlem döneminde kaydedilen en yüksek can kaybı oranlarına ulaşan bu silsile, ulusal literatürde "asrın felaketi" olarak kavramsallaştırılmıştır. Kronolojik olarak; ilk sarsıntı saat 04:17'de Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesi merkezli $M_w=7.7$ büyüklüğünde, ikinci sarsıntı ise aynı gün 13:24'te Elbistan odaklı $M_w=7.6$ büyüklüğünde gerçekleşmiştir. 11 ili doğrudan ve yıkıcı bir biçimde etkileyen bu sismik hareket, komşu bölgelerde de yüksek ivmeli yer hareketleri şeklinde hissedilerek geniş bir etki alanında tahribata yol açmıştır. Depremler ve etkilediği bölge Görsel 1'de gösterilmiştir.



Görsel 1. Ana depremler ve etkilenen bölge (İletişim Başkanlığı, 2023)

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş'ta meydana gelen depremlerin ardından ilgili Bakanlık tarafından yapılan hasar tespit çalışmalarındaki illere göre hasar dağılımı konut bazında Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. İl bazında hasar tespit raporu (Konut sayısı) (6 Mart 2023)

İl	Toplam Acil + Ağır + Yıkık	%	Orta Hasarlı	%	Az Hasarlı	%
Adana	2952	0.6	11768	8.9	71072	5.55
Adıyaman	56256	10.9	18715	14.2	72729	5.68
Diyarbakır	8602	1.7	11209	8.5	113223	8.85
Elazığ	10156	2.0	1522	1.2	31151	2.43
Gaziantep	29155	5.6	20251	15.4	236497	18.48
Kahramanmaraş	99326	19.2	17887	13.6	161137	12.59
Malatya	71519	13.8	12801	9.7	107765	8.42
Hatay	215255	41.6	25957	19.7	189317	14.79
Kilis	2514	0.5	1303	1.0	27969	2.19
Osmaniye	16111	3.1	4122	3.1	69466	5.43
Şanlıurfa	6163	1.2	6041	4.6	199401	15.58
Bölge toplamı	518009	100.0	131576	100.0	1279727	100.00

Çizelge 1’den görüleceği üzere en büyük yapısal kayıplar Hatay, Kahramanmaraş, Adıyaman ve Malatya illerinde oluşmuştur. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan betonarme bina en fazla hasar oluşan dört ilden biri olan Malatya ilinde yer almaktadır. Farklı nedenlerden farklı düzeylerde hasar almış betonarme yapı örnekleri Görsel 2’de gösterilmiştir.



Görsel 2. BA yapılarda hasar örnekleri a) çarpışma hasarı; b) yumuşak kat hasarı; c) yetersiz betonarme; d) yetersiz betonarme; e) kısa kolon; f) dolgu duvar hasarları; g) kısa kiriş hasarı; h) yetersiz paspayı; i) yumuşak/zayıf kat

Bu çalışmada Malatya ilinde depremlerden farklı düzeyde etkilenen 12 adet betonarme yapı dikkate alınmıştır. Bu çalışma kapsamında Malatya ilinde dikkate alınan kısmi veya toptan göçmeye maruz kalmış on iki adet betonarme binanın deprem öncesi ve sonrası görselleri

Görsel 3’te gösterilmiştir. Deprem öncesi görseller Google Street uygulaması yardımı ile elde edilmiştir.

No
1

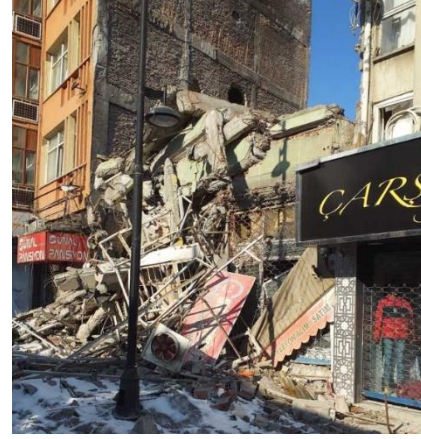
Deprem Öncesi (Google Street)



Deprem Sonrası



2



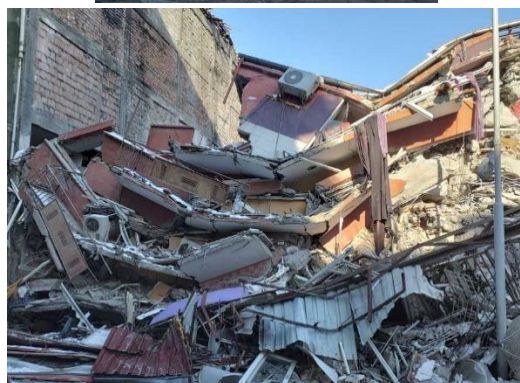
3



4



5



6



7



8



9



10



11



12



Görsel 3. İncelenen BA binaların deprem öncesi ve sonrası durumları

Bu çalışma kapsamında, Malatya ilinde depremlere maruz kalmış bu yapılardaki olumsuzluk parametrelerinin dağılımı Çizelge 2’ de yapılmıştır.

Çizelge 2. İncelenen yapılarda gözlemlenen düzensizlikler

Bina No	Yumuşak/Zayıf Kat	Kısa Kolon	Çarpışma Etkisi	Ağır Çıkma	Planda Düzensizlik
1	√	√	X	√	X
2	√	√	√	X	X
3	√	X	√	√	X
4	√	X	√	√	X
5	√	X	√	√	X
6	√	√	√	√	X
7	√	√	X	√	X
8	√	√	X	√	√
9	√	√	√	√	√
10	√	X	√	√	X
11	√	X	√	√	X

12	√	X	X	√	X

12 farklı binanın deprem riskini etkileyen yapısal düzensizliklerini (yumuşak kat, kısa kolon, çarpışma etkisi, ağır çıkma ve planda düzensizlik) karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Sunulan veriler ışığında 12 bina üzerinde yapılan yapısal düzensizlik analizi, incelenen yapı stokunun deprem güvenliği açısından ciddi riskler taşıdığını ve mühendislik açısından kritik kusurların yaygın olduğunu göstermektedir. İncelenen tüm binalarda (12/12) istisnasız görülen "Yumuşak/Zayıf Kat" düzensizliği, yapıların giriş katlarının üst katlara oranla daha düşük rijitliğe sahip olduğunu ve olası bir sarsıntıda ani çökme riskinin çok yüksek olduğunu kanıtlamaktadır; buna ek olarak binaların %92'sinde (11/12) bulunan "Ağır Çıkma" kusuru, yapısal kütle dağılımındaki dengesizliğin ve kolonlara binen ek yüklerin genel bir sorun haline geldiğini ortaya koymaktadır. Burada belirlenen yumuşak/zayıf kat görsele dayalı olarak göreceli olarak değerlendirilmiştir. Özellikle tüm risk faktörlerini (5/5) bünyesinde barındıran 9 numaralı bina ile dört farklı düzensizliğe sahip olan 8 numaralı bina, teknik açıdan en yüksek riskli yapılar olarak öne çıkarken, "Kısa Kolon" etkisinin binaların yarısından fazlasında görülmesi gevrek kırılma riskinin yaygınlığını teyit etmektedir. Sonuç olarak, binaların büyük bir kısmında birden fazla yapısal kusurun bir arada bulunması nedeniyle, bu yapıların mevcut halleriyle deprem yönetmeliği standartlarını karşılamaktan uzak olduğu görülmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan saha incelemeleri ve yapısal düzensizlik analizleri sonucunda, incelenen 12 binadan oluşan yapı stokunun deprem güvenliği açısından oldukça kırılgan bir tablo sergilediği görülmektedir. Özellikle tüm yapılarda tespit edilen 'Yumuşak Kat' düzensizliği ile binaların %92'sini etkileyen 'Ağır Çıkma' kusuru, bölgedeki yapı üretim sürecinde mimari estetik veya alan kazanımı kaygılarının, temel mühendislik ve can güvenliği prensiplerinin önüne geçtiğini kanıtlamaktadır. Bu bağlamda, yumuşak kat etkisini gidermek adına zemin katlarda betonarme perde duvar ilaveleri yapılması, kısa kolon etkisinin görüldüğü noktalarda kolonların tam boy kuşatılarak sünekliğinin artırılması ve çarpışma riski bulunan binalar arasında sönümleyici sistemlerin kullanılması öncelikli çözüm önerileri olarak sunulmaktadır. Nihai olarak, bu denli yoğun düzensizlik içeren yapıların yerel yönetimler tarafından 'öncelikli dönüşüm alanı' kapsamına alınması ve kapsamlı bir kentsel rehabilitasyon programının başlatılması, olası bir afet sonrasında yaşanacak can ve mal kayıplarını minimize etmek adına zorunlu bir adım olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- [25] Aras, F., Doğan, T. P., Öztürk, M., Tün, M., Işık, E., & Arslan, M. H. Assessment of the damage caused by the 6 February 2023 earthquakes on old and new dated reinforced concrete buildings in Elbistan, Turkey, *Advances in Structural Engineering*, 13694332251375194, 2025.
- [26] Atar, M., İnce, O., Taş, Ö. F., Özmen, A., & Sayın, E. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında betonarme kolonlarda enine donatı kusurlarının incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), 221-230, 2024.

- [27] Avgın, S., Köse, M. M., & Özbek, A. Damage assessment of structural and geotechnical damages in Kahramanmaraş during the February 6, 2023 earthquakes, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 57, 101811, 2024.
- [28] Dedeoglu, I. O., Yetkin, M., Tunc, G., & Ozbulut, O. E. Evaluating earthquake-induced damage in Dogansehir, Malatya after 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence: Geotechnical and structural perspectives, *Journal of Building Engineering*, 112266, 2025.
- [29] Dinçer, A. E., Dincer, N. N., Tekin-Koru, A., Yaşar, B., & Yılmaz, Z. The impact of Kahramanmaraş (2023) earthquakes: A comparative case study for Adıyaman and Malatya, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, 104647, 2024.
- [30] Işık, E., Shao, Y. B., Hadzima-Nyarko, M., Radu, D., Bulajic, B., & Lozancic, S. Enhancing the seismic safety of upgraded RC buildings using FRP retrofitting: analytical and field evidence from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-35, 2025.
- [31] Işık, E., & Hamamcıoğlu, M. Risk prioritization of RC buildings in Bitlis (Türkiye) in the light of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Buildings*, 15(19), 3552, 2025.
- [32] İnce, E. G. Seismic performance of RC buildings with one-way joist slab: Insights from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structural Concrete*, 2025.
- [33] İnce, E. G., Çakıl, B., Şimşek, M., & İnce, O. Evaluation of ground motions and seismic performance of RC buildings after 2023 Kahramanmaraş earthquakes: design and construction deficiencies, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-28, 2025.
- [34] Onat, O., Yön, B., Uslu, A., Öncü, M. E., Varolgüneş, S., Karaşin, İ. B., & Gör, M. Seismic resistance and performance evaluation of masonry dwellings after the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquake sequence in Türkiye, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 18(04), 2450013, 2024.
- [35] Özmen, A., İnce, O., Taş, Ö. F., Atar, M., Ozbulut, O. E., & Sayın, E. Seismic performance assessment of structures in Malatya Province after 6 February 2023 Turkey earthquake sequences, *Natural Hazards*, 121(5), 5293-5326, 2025.
- [36] Peker, F. Ü., Yuzbasi, J., Işık, E., Büyüksaraç, A., & Avcil, F. Damage assessment, regional ground motion record evaluation, and seismic performance analysis of a high-rise 14-story dual system building after the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structures*, 80, 109897, 2025.
- [37] Turan, A. I., Celik, A., Kumbasaroglu, A., & Yalciner, H. Assessment of reinforced concrete building damages following the Kahramanmaraş earthquakes in Malatya, Turkey (February 6, 2023), *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 54, 101718, 2024.
- [38] Yıldız, Ö., & Kına, C. Geotechnical and structural investigations in Malatya province after Kahramanmaraş Earthquake on February 6, 2023, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 686-703, 2023.
- [39] Yuzbasi, J. Post-earthquake damage assessment: field observations and recent developments with recommendations from the Kahramanmaraş earthquakes in Türkiye on February 6th, 2023 (Pazarcık M7.8 and Elbistan M7.6), *Journal of Earthquake Engineering*, 29(16), 3367-3392, 2025.

**FARKLI İŞLEMLER GÖRDÜKTEN SONRA YÜZEYLERİNE TEK VE ÇİFT
KOMPONENTLİ PARKE VERNİKLERİ UYGULANMIŞ ADI DIŞBUDAK
ODUNUNDA EV İÇİ KİMYASALINA MARUZ KALMANIN RENK
PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

Mete AKTER

Dual, Beylikdüzü, İstanbul, Türkiye

meteakter@hotmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9933-9711

Doç. Dr. Ümit AYATA

*Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü,
Bayburt, Türkiye

*Sorumlu yazar: umitayata@yandex.com, ORCID ID: 0000-0002-6787-7822

Özet

Bu çalışmada, farklı işlemler (212°C’de 2 saat ısıtma işlem ve 2 farklı ağartma uygulamaları: oksalik asit: $C_2H_2O_4$ ve hidrojen peroksit: H_2O_2 + sodyum hidroksit: NaOH) gördükten sonra yüzeylerine tek ve çift komponentli parke vernikleri uygulanmış adi dışbudak (*Fraxinus excelsior*) odununu yüzeylerinin ev içi kimyasalından birisi olan beyaz sirkeye 18 saat süre ile maruz kalması sonrasında renk parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir. 12 farklı deney grubu örneği oluşturulmuştur. Tek ve çift komponentli parke vernikleri endüstriyel uygulamalara göre fırça yardımı ile uygulanmıştır. Sonuçlara göre farklı verilerde ΔE^* değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan beyaz sirke bütün tek ve çift komponentli parke vernikleri ile kaplanmış ahşap yüzeyler üzerinde renk parametrelerini değiştirdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: adi dışbudak, ısıtma işlem, ağartma, parke verniği, renk parametreleri

**Effects of Exposure to Household Chemicals on Color Parameters of Common Ash
Wood After Different Treatments and Application of Single and Two-Component
Parquet Varnishes**

Abstract

In this study, the effects of exposure to white vinegar, a household chemical, for 18 h on the color parameters of common ash (*Fraxinus excelsior*) wood, which had undergone different treatments (2 h of heat treatment at 212°C and 2 different bleaching applications: oxalic acid: $C_2H_2O_4$ and hydrogen peroxide: H_2O_2 + sodium hydroxide: NaOH) and then had single and two-component parquet varnishes applied to its surface, were investigated. Twelve different experimental groups were created. Single and two-component parquet varnishes were applied using a brush, according to industrial application methods. ΔE^* values were calculated for different data points based on the results. In the study, white vinegar was found to alter the color parameters on all single and two-component parquet varnished wood surfaces.

Keywords: Common ash, heat treatment, bleaching, parquet varnish, color parameters

1. Giriş

Eski çağlardan beri insanlar, ağaç kaynaklarının bulunduğu yerlerde yapı malzemesi olarak her zaman ahşabı tercih etmişlerdir. Bunun nedeni, üstün mukavemet-ağırlık oranı, hafiflik, ısı yalıtımı, işlenebilirlik ve daha iyi deprem performansı gibi doğal avantajlarıdır. Günümüzde insanlar çevre dostu ve sürdürülebilir kalkınma modeline büyük önem vermektedir. Yeşil ve yenilenebilir bir yapı malzemesi olarak ahşap, günümüz inşaat mühendisliğinde hala yaygın olarak kullanılmaktadır (Fu ve ark., 2019).

Çevre dostu bir modifikasyon yöntemi olarak ısıl işlem, ağaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl işlemin temel prensibi, özellikle düşük molekül ağırlıklı hemiselülozlar olmak üzere, ağaç hücre duvarı maddesinin termal bozunması ve moleküler yeniden yapılandırılmasıdır (Fu ve ark., 2020). Ahşabın termal modifikasyonu, malzemenin 15 dakikadan 24 saate kadar sürelerle 100 ile 300°C arasında bir sıcaklığa maruz bırakılmasını içeren bir işlemdir. İşlem döngüsüne bağlı olarak, işlenmiş malzemelerde farklı özellikler elde etmek mümkündür. Örneğin, işlemin amacı, ısı ve buhar kullanarak ahşabı yumuşatmak, iç gerilimi gidermek ve sonraki üretim süreçlerini kolaylaştırmak; veya boyutsal kararlılığı ve dayanıklılığı iyileştirmek için malzemenin kontrollü bir şekilde bozulmasını sağlamak olabilmektedir. Bu amaçla, sıcaklık aralığı genellikle 150 ile 260°C arasında oluğu bildirilmiştir (Jones ve ark., 2019; Gennari ve ark., 2021).

Ağartıcı madde, kimyasal reaksiyon yoluyla bir maddeyi aydınlatan veya beyazlatan bir malzemedir. Ağartma reaksiyonları genellikle renk sistemlerini bozan oksidatif veya redüktif süreçleri içermektedir. Bu süreçler, maddedeki kromoforik grupların tahrip edilmesini veya değiştirilmesini ve renk maddelerinin ağartma işleminde daha kolay uzaklaştırılabilen daha küçük, daha çözünür birimlere ayrışmasını içerebilmektedir. En yaygın ağartıcı maddeler genellikle iki kategoriye ayrılmaktadır: klor ve ilgili bileşikler (sodyum hipoklorit gibi) ve hidrojen peroksit ve sodyum perborat gibi peroksijen ağartıcı maddeler. İndirgeyici ağartıcılar başka bir kategoriye temsil etmektedir (Farr ve ark., 2000). Ahşap ağartıcı, ahşabı beyazlatmak ve tanen lekelerini gidermek için kullanılan %95'ten fazla saflıkta oksalik asit formülasyonudur (Douglas ve ark., 2025).

Farklı tip, yapı ve görünümdeki ahşap parkeler, konut binalarında, belediye binalarında, kamu binalarında ve spor salonlarında en yaygın döşeme elemanları arasındadır. Günlük yaşamımızda döşeme yüzeylerinin çeşitli etkilere (çeşitli sıvılara, deterjanlara ve diğer çeşitli lekeleyici veya aşındırıcı maddelere maruz kalma, film tabakasının çizilmesi veya daha derin plastik deformasyonlara yol açan daha büyük yükler, çeşitli darbeler, belirli bir yerin daha fazla maruz kalması nedeniyle kaplama filminin aşınması vb.) sık sık maruz kalması, döşemeyi iç mekânda en çok maruz kalan unsurlardan biri haline getirmektedir. Ahşap döşemelerin işlevselliğini ve görünümünü korumak için, tarih boyunca doğal maddelere (yağlar ve balmumları) dayalı farklı tipte yüzey kaplamaları kullanıldığı bildirilmiştir (Williams, 1999; Pavlič ve ark., 2021).

Ahşap döşeme ve kaplamaların kalitesi esas olarak yüzey sertliği, aşınma direnci, darbe direnci, boyutsal kararlılık ve renk kararlılığı ile belirlenir. Ahşap döşemelerin yüzey kalitesini değerlendirmek için, topuk izi direnci de dahil olmak üzere bazı yeni testler ortaya çıkmaktadır (Sykes, 2005; Koubaa, 2007).

Bu çalışmada, farklı işlemler gördükten sonra yüzeylerine tek ve çift komponentli parke vernikleri uygulanmış dişbudak odununda ev içi kimyasalına maruz kalmanın renk parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, adi dişbudak (*Fraxinus excelsior*) odununa ait olan deney örnekleri 90 mm x 90 mm x 15 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Örnekler üzerinde iklimlendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir (ISO 554, 1976).

Isıl işlem uygulamaları 212°C’de 2 saat süre ile yapılmıştır. Isıl işlem görmüş ve görmemiş yüzeyler farklı iki tip ağartma kimyasalları [oksalik asit ($C_2H_2O_4$) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) + sodyum hidroksit ($NaOH$)] ile ağartılmışlardır.

Ağartılmış ve ağartılmamış olan ısıtılmış ve işlemsiz yüzeyler üzerinde tek ve çift komponentli parke vernikleri endüstriyel uygulamalara göre fırça yardımı ile uygulanmıştır (ASTM D 3023-98, 2017). Çalışmaya ait olan deney grupları aşağıda verilmiştir.

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek, yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek, yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneği, deney grubundaki tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneği, deney grubundaki iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılmış test numunesi, tek bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılmış test numunesi, iki bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - 1: Deney grubundan alınan ve 200°C’de 2 saat süreyle ısıtılmış numune, yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - 2: Deney grubundan alınan ve 200°C’de 2 saat süreyle ısıtılmış numune, yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - OA - 1: 200°C’de 2 saat ısıtılma işleminden geçirildikten sonra oksalik asit ile ağartılan test numunesi, tek bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - OA - 2: 200°C’de 2 saat ısıtılma işleminden geçirildikten sonra oksalik asit ile ağartılan test numunesi, iki bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - HP - SH - 1: 200°C’de 2 saat ısıtılma işleminden sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test numunesi, tek bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - HP - SH - 2: 200°C’de 2 saat süreyle ısıtılma işleminden geçirildikten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test numunesi, iki bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Daha sonra yüzeyler üzerinde beyaz sirke ile muamele edilmiş filtre kağıdına 18 saat süre ile maruz bırakılmışlardır (TS EN 12720+A1, 2015). Yüzey renk değişimleri, bir renk cihazı ve ASTM D 2244-3 (2007) standardı ile belirlenmiştir. ΔC^* parametresi renk doygunluğundaki farkı, ΔH^* ise ton veya gölge farklılığını ifade etmektedir (Lange, 1999).

Toplam renk farkları aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır.

$$\Delta C^* = (C^*_{\text{işlem görmüş}}) - (C^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (1)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{0.5} \quad (2)$$

$$h^0 = \arctan (b^*/a^*) \quad (3)$$

$$\Delta H^* = [(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{0.5} \quad (4)$$

$$\Delta a^* = (a^*_{\text{işlem görmüş}}) - (a^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (5)$$

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0.5} \quad (6)$$

$$\Delta L^* = (L^*_{\text{işlem görmüş}}) - (L^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (7)$$

$$\Delta b^* = (b^*_{\text{işlem görmüş}}) - (b^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (8)$$

Çizelge 1’de Jirouš ve Ljuljka, (1999)’ya göre renk değişim aralığı ile ilgili ve Δa^* , ΔL^* , Δb^* ve ΔC^* değerleri için (Lange, 1999) bazı önemli bilgiler gösterilmektedir.

Çizelge 1. Renk parametreleri ile ilgili önemli bilgiler

Δa^* , ΔL^* , Δb^* ve ΔC^* (Lange, 1999)	Parametre	Referansa göre durumu		
		Negatif		Pozitif
	Δb^*	Daha mavi		Daha sarı
	ΔL^*	Daha koyu		Daha açık
	Δa^*	Daha yeşil		Daha kırmızı
	ΔC^*	Mat, daha bulanık		Daha net ve daha parlak
Jirouš ve Ljuljka, (1999) renk aralığı	ΔE^* aralığı	Renk değişim tahmini	ΔE^* aralığı	Renk değişim tahmini
	< 0.20	Anlaşılamaz	3.00 - 6.00	Çok belirgin
	0.20 - 0.50	Çok hafif	6.00 - 12.00	Yoğun
	0.50 - 1.50	Hafif	> 12.00	Çok yoğun
	1.50 - 3.00	Belirgin		

Bir istatistik programı tarafından standart sapma, varyans analizleri, % değişim oranları, en düşük ve en yüksek ölçümlere ait veriler, ortalamalar, ve homojenlik grupları belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasında ölçülen L^* parametresine sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, Kontrol – 1 (%0.69), Kontrol – 2 (%0.94), Kontrol - OA – 2 (%1.70), Kontrol - HP - SH – 1 (%3.30), Kontrol - HP - SH - 2 (%0.44) ve HT - HP - SH – 2 (%0.69) malzemelerinde artışlar elde edilirken, Kontrol - OA – 1 (%2.68), HT – 1 (%3.20), HT - 2 (%2.84), HT - OA - 1 (%21.19), HT - OA - 2 (%5.63) ve HT - HP - SH – 1 (%17.43) malzemelerinde azalışlar görülmüştür (Çizelge 2).

Çizelge 2. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasında ait ölçülen L^* parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulanması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	76.48	↑0.69	BC	0.67	75.55	77.45	0.88
	Var	77.01		A*	0.26	76.64	77.42	0.33
Kontrol - 2	Yok	76.21	↑0.94	C	0.51	75.42	77.32	0.67
	Var	76.93		AB	0.41	76.34	77.34	0.54
Kontrol - OA - 1	Yok	71.94	↓2.68	G	0.66	70.69	73.25	0.92
	Var	70.01		I	0.09	69.88	70.19	0.13
Kontrol - OA - 2	Yok	73.08	↑1.70	F	0.48	72.51	74.16	0.66
	Var	74.32		D	0.15	74.09	74.55	0.20
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	71.24	↑3.30	H	0.35	70.67	71.61	0.50
	Var	73.59		E	0.14	73.33	73.75	0.19
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	72.77	↑0.44	F	0.45	71.97	73.60	0.63
	Var	73.09		F	0.08	72.94	73.19	0.11
HT - 1	Yok	33.46	↓3.20	N	0.57	32.46	34.08	1.69
	Var	32.39		O	0.18	32.11	32.64	0.55
HT - 2	Yok	34.54	↓2.84	M	0.30	34.02	35.03	0.86
	Var	33.56		N	0.27	33.11	33.96	0.81
HT - OA - 1	Yok	39.78	↓21.19	L	0.54	39.12	40.94	1.36
	Var	31.35		P	0.60	30.69	32.23	1.90
HT - OA - 2	Yok	43.91	↓5.63	J	1.00	42.24	45.06	2.28
	Var	41.44		K	1.01	39.75	42.85	2.44

HT - HP - SH - 1	Yok	32.01	↓17.43	O	0.37	31.39	32.64	1.15
	Var	26.43		R**	0.86	24.14	27.14	3.24
HT - HP - SH - 2	Yok	33.89	↑0.69	N	0.58	32.75	34.76	1.72
	Var	34.61		M	0.52	33.61	34.99	1.50

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.
Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.
Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrası ait ölçülen a^* parametresine sonuçları Çizelge 3'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, a^* değerlerinde HT - OA – 1 için %2.86, Kontrol - OA – 1 için %4.83, Kontrol - HP - SH – 1 için %0.25 oranlarında artış görülürken, Kontrol – 1 için %20.07, Kontrol – 2 için %4.84, Kontrol - OA – 2 için %10.61, Kontrol - HP - SH – 2 için %6.64, HT – 1 için %7.94, HT – 2 için %9.49, HT - OA – 2 için %8.78, HT - HP - SH – 1 için %149.23 ve HT - HP - SH – 2 için %18.69 oranlarında artışlar belirlenmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrası ait ölçülen a^* parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulaması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	5.68	↓20.07	G	0.24	5.32	5.99	4.16
	Var	4.54		K	0.13	4.32	4.71	2.89
Kontrol - 2	Yok	4.96	↓4.84	IJ	0.21	4.55	5.20	4.27
	Var	4.72		JK	0.15	4.54	4.94	3.23
Kontrol - OA - 1	Yok	7.86	↑4.83	DE	0.20	7.57	8.26	2.54
	Var	8.24		BC	0.21	7.76	8.43	2.49
Kontrol - OA - 2	Yok	6.60	↓10.61	F	0.42	5.66	6.97	6.33
	Var	5.90		G	0.25	5.40	6.20	4.17
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	4.05	↑0.25	L	0.26	3.45	4.41	6.45
	Var	4.06		L	0.10	3.83	4.20	2.44
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	2.41	↓6.64	N	0.25	2.07	2.87	10.27
	Var	2.25		N	0.18	1.98	2.51	7.81
HT - 1	Yok	8.31	↓7.94	B	0.44	7.69	9.09	5.34
	Var	7.65		E	0.36	7.20	8.36	4.75
HT - 2	Yok	8.85	↓9.49	A*	0.25	8.46	9.13	2.77
	Var	8.01		CD	0.30	7.36	8.44	3.73
HT - OA - 1	Yok	5.25	↑2.86	HI	0.37	4.57	5.90	6.98
	Var	5.40		H	0.88	4.41	6.44	16.31
HT - OA - 2	Yok	3.76	↓8.78	L	0.34	3.33	4.26	8.92
	Var	3.43		M	0.38	2.85	4.00	11.11
HT - HP - SH - 1	Yok	3.90	↓149.23	L	0.24	3.38	4.14	6.17
	Var	-1.92		O**	0.25	-2.16	-1.58	-12.83
HT - HP - SH - 2	Yok	6.42	↓18.69	F	0.18	6.16	6.71	2.74
	Var	5.22		HI	0.27	4.83	5.59	5.19

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.
Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen b^* parametresine sonuçları Çizelge 4'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, b^* değerlerinde Kontrol - 1 için %3.08 ve Kontrol - OA - 1 için %5.42 oranlarında artış bulunurken, Kontrol - 2 için %2.35, Kontrol - OA - 2 için %3.52, Kontrol - HP - SH - 1 için %15.80, Kontrol - HP - SH - 2 için %3.94, HT - 1 için %6.92, HT - 2 için %2.26, HT - OA - 1 için %23.78, HT - OA - 2 için %9.09, HT - HP - SH - 1 için %73.96 ve HT - HP - SH - 2 için %10.46 oranlarında azalışlar tespit edilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen b^* parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulaması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	20.43	↑3.08	G	0.52	19.90	21.29	2.52
	Var	21.06		EF	0.22	20.64	21.31	1.04
Kontrol - 2	Yok	21.27	↓2.35	E	0.47	20.46	21.83	2.20
	Var	20.77		FG	0.41	20.34	21.41	1.96
Kontrol - OA - 1	Yok	30.08	↑5.42	B	0.38	29.42	30.53	1.25
	Var	31.71		A*	0.24	31.24	31.98	0.75
Kontrol - OA - 2	Yok	23.61	↓3.52	C	0.45	22.96	24.45	1.92
	Var	22.78		D	0.31	22.28	23.17	1.34
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	23.29	↓15.80	C	0.54	22.60	24.16	2.33
	Var	19.61		H	0.21	19.25	19.84	1.05
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	19.52	↓3.94	H	0.48	18.92	20.38	2.46
	Var	18.75		I	0.19	18.37	18.99	1.02
HT - 1	Yok	11.41	↓6.92	L	0.67	10.42	12.51	5.88
	Var	10.62		M	0.32	10.16	11.14	3.02
HT - 2	Yok	12.86	↓2.26	J	0.36	12.38	13.57	2.76
	Var	12.57		J	0.63	11.30	13.25	5.01
HT - OA - 1	Yok	11.06	↓23.78	L	0.37	10.65	11.72	3.33
	Var	8.43		O	1.12	6.97	9.72	13.29
HT - OA - 2	Yok	12.10	↓9.09	K	0.21	11.89	12.49	1.77
	Var	11.00		LM	0.15	10.76	11.21	1.35
HT - HP - SH - 1	Yok	8.64	↓73.96	O	0.41	8.21	9.47	4.80
	Var	2.25		P**	0.27	1.94	2.77	12.08
HT - HP - SH - 2	Yok	11.28	↓10.46	L	0.53	10.27	12.11	4.67
	Var	10.10		N	0.24	9.63	10.35	2.33

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.

Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen C^* parametresine sonuçları Çizelge 5'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, C^* parametresinde Kontrol - 1 için %1.56 ve Kontrol - OA - 1 için %5.40 oranlarında artış elde edilirken, Kontrol - 2 için %2.43, Kontrol - OA - 2 için %4.00, Kontrol - HP - SH - 1 için %15.27, Kontrol - HP - SH - 2 için %4.02, HT - 1 için %7.23, HT - 2 için %4.48, HT - OA - 1 için %18.22, HT - OA - 2 için %9.00, HT - HP - SH - 1 için %68.51 ve HT - HP - SH - 2 için %12.40 oranlarında azalışlar bulunmuştur (Çizelge 5).

Çizelge 5. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen C^* parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulaması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	21.21	↑1.56	F	0.54	20.63	22.12	2.57
	Var	21.54		EF	0.25	21.07	21.82	1.15
Kontrol - 2	Yok	21.84	↓2.43	E	0.46	21.05	22.43	2.12
	Var	21.31		F	0.43	20.84	21.94	1.99
Kontrol - OA - 1	Yok	31.09	↑5.40	B	0.39	30.42	31.50	1.25
	Var	32.77		A*	0.24	32.34	33.06	0.74
Kontrol - OA - 2	Yok	24.51	↓4.00	C	0.45	23.84	25.27	1.85
	Var	23.53		D	0.30	23.08	23.92	1.27
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	23.64	↓15.27	D	0.55	22.95	24.56	2.33
	Var	20.03		G	0.21	19.63	20.27	1.07
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	19.67	↓4.02	G	0.50	19.04	20.56	2.54
	Var	18.88		H	0.18	18.54	19.12	0.95
HT - 1	Yok	14.11	↓7.23	K	0.79	13.00	15.34	5.59
	Var	13.09		L	0.39	12.71	13.93	2.98
HT - 2	Yok	15.61	↓4.48	I	0.39	15.21	16.35	2.52
	Var	14.91		J	0.66	13.49	15.72	4.45
HT - OA - 1	Yok	12.24	↓18.22	M	0.45	11.63	13.12	3.70
	Var	10.01		O	1.41	8.40	11.63	14.04
HT - OA - 2	Yok	12.67	↓9.00	LM	0.25	12.35	13.03	1.96
	Var	11.53		N	0.15	11.33	11.76	1.29
HT - HP - SH - 1	Yok	9.40	↓68.51	P	0.39	8.88	10.27	4.16
	Var	2.96		R**	0.36	2.51	3.51	12.24
HT - HP - SH - 2	Yok	12.98	↓12.40	L	0.48	12.10	13.72	3.66
	Var	11.37		N	0.27	10.86	11.68	2.41

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.

Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen h^0 parametresine sonuçları Çizelge 6'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, h^0 parametresinde HT - 2 için %3.68, Kontrol - HP - SH - 2 için %0.24, Kontrol - 1 için %4.61, Kontrol - 2 için %0.44, Kontrol - OA - 1 için %0.09, Kontrol - OA - 2 için %1.48, HT - 1 için %0.57, HT - HP - SH - 1 için %98.55 ve HT - HP - SH - 2 için %3.88 oranlarında artışlar bulunurken, Kontrol - HP - SH - 1 için %2.23, HT - OA - 2 için %0.11 ve HT - OA - 1 için %11.11 oranlarında azalışlar elde edilmiştir (Çizelge 6).

Çizelge 6. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen h^0 parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulaması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	74.45	↑4.61	H	0.45	73.73	75.17	0.61
	Var	77.88		DE	0.31	77.52	78.35	0.39
Kontrol - 2	Yok	76.86	↑0.44	F	0.57	76.34	78.09	0.74
	Var	77.20		EF	0.23	76.70	77.42	0.30
Kontrol - OA - 1	Yok	75.36	↑0.09	G	0.31	74.76	75.72	0.42
	Var	75.43		G	0.35	74.97	76.20	0.46
Kontrol - OA - 2	Yok	74.38	↑1.48	H	0.98	73.47	76.51	1.31
	Var	75.48		G	0.60	74.53	76.47	0.79
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	80.09	↓2.23	C	0.66	79.10	81.58	0.82
	Var	78.30		D	0.23	77.95	78.75	0.29
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	82.95	↑0.24	B	0.60	81.85	83.76	0.72
	Var	83.15		B	0.58	82.32	83.97	0.69
HT - 1	Yok	53.94	↑0.57	P**	0.59	53.12	54.66	1.10
	Var	54.25		P	1.28	51.86	56.14	2.36
HT - 2	Yok	55.45	↑3.68	O	0.63	54.33	56.40	1.14
	Var	57.49		N	0.82	56.49	59.18	1.42
HT - OA - 1	Yok	64.64	↓11.11	K	1.20	62.62	66.83	1.85
	Var	57.46		N	1.34	55.80	59.15	2.33
HT - OA - 2	Yok	72.74	↓0.11	I	1.40	70.36	74.33	1.92
	Var	72.66		I	1.90	70.10	75.74	2.61
HT - HP - SH - 1	Yok	65.69	↑98.55	J	1.54	63.27	67.63	2.34
	Var	130.43		A*	1.28	127.97	131.98	0.98
HT - HP - SH - 2	Yok	60.30	↑3.88	M	1.24	58.11	61.96	2.06
	Var	62.64		L	1.16	61.16	64.60	1.85

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.
 Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.
 Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - OA - 1: Isıtıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - OA - 2: Isıtıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - HP - SH - 1: Isıtıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 Kontrol - HP - SH - 2: Isıtıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması tarafından elde edilen toplam renk farklılıklarına ait sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Renk Kriteri (Jirouš ve Ljuljka, 1999) açısından bakıldığında, sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması ile Kontrol - 1, Kontrol - 2, Kontrol - HP - SH - 2, HT - 1 ve HT - 2 malzemeleri “hafif (0.50 - 1.50)” kriterinin, Kontrol - HP - SH - 1 malzemesi “çok belirgin (3.00 - 6.00)” kriterinin, HT - OA - 1 ve HT - HP - SH - 1 malzemeleri “yoğun (6.00 - 12.00)” kriterinin, Kontrol - OA - 1, Kontrol - OA - 2, HT - OA - 2 ve HT - HP - SH - 2 malzemeleri “belirgin (1.50 - 3.00)” kriterinin elde edildiği görülmüştür. ΔE^* değerleri Kontrol - 1 malzemesi için 1.41, Kontrol - 2 malzemesi için 0.90, Kontrol - OA - 1 malzemesi için 2.56, Kontrol - OA - 2 malzemesi için 1.65, Kontrol - HP - SH - 1 malzemesi için 4.37, Kontrol - HP - SH - 2 malzemesi için 0.85, HT - 1 malzemesi için 1.49, HT - 2 malzemesi için 1.32, HT - OA - 1 malzemesi için 8.83, HT - OA - 2 malzemesi için 2.73, HT - HP - SH - 1 malzemesi için 10.29 ve HT - HP - SH - 2 malzemesi için 1.83 olarak belirlenmiştir (Çizelge 7).

Çizelge 7. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması tarafından elde edilen toplam renk farklılıklarına ait sonuçları

Malzeme Türü	ΔL^* ▼	Δa^* ▼	Δb^* ▼	ΔC^* ▼	ΔH^* ▼	ΔE^* ▼	Renk Kriteri (Jirouš ve Ljuljka, 1999)
Kontrol - 1	0.54	-1.14	0.63	0.34	1.26	1.41	Hafif (0.50 - 1.50)
Kontrol - 2	0.72	-0.24	-0.49	-0.54	0.12	0.90	Hafif (0.50 - 1.50)
Kontrol - OA - 1	-1.92	0.38	1.64	1.68	0.06	2.56	Belirgin (1.50 - 3.00)
Kontrol - OA - 2	1.24	-0.70	-0.82	-0.98	0.44	1.65	Belirgin (1.50 - 3.00)
Kontrol - HP - SH - 1	2.36	0.01	-3.68	-3.62	0.69	4.37	Çok belirgin (3.00 - 6.00)
Kontrol - HP - SH - 2	0.33	-0.16	-0.77	-0.79	-	0.85	Hafif (0.50 - 1.50)
HT - 1	-1.08	-0.66	-0.79	-1.02	0.12	1.49	Hafif (0.50 - 1.50)
HT - 2	-0.98	-0.84	-0.28	-0.70	0.55	1.32	Hafif (0.50 - 1.50)
HT - OA - 1	-8.43	0.15	-2.63	-2.23	1.40	8.83	Yoğun (6.00 - 12.00)
HT - OA - 2	-2.48	-0.33	-1.09	-1.14	-	2.73	Belirgin (1.50 - 3.00)
HT - HP - SH - 1	-5.58	-5.81	-6.39	-6.45	5.75	10.29	Yoğun (6.00 - 12.00)
HT - HP - SH - 2	0.72	-1.20	-1.18	-1.61	0.48	1.83	Belirgin (1.50 - 3.00)

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - OA - 1: Isıtma işlemi görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - OA - 2: Isıtma işlemi görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - HP - SH - 1: Isıtma işlemi görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 Kontrol - HP - SH - 2: Isıtma işlemi görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Çizelge 8'de varyans analizi sonuçlarını sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre, malzeme türü (A), sirke emdirilmiş filtre uygulaması (B) ve etkileşim (AB) anlamlı olarak elde edilmiştir (Çizelge 8).

Çizelge 8. Varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Test	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	p<0.05 (*: Anlamlı)
Malzeme Türü (A)	<i>L</i> *	94272.660	11	8570.242	30834.750	0.000*
	<i>a</i> *	1153.738	11	104.885	1008.382	0.000*
	<i>b</i> *	11849.256	11	1077.205	5264.962	0.000*
	<i>C</i> *	11011.597	11	1001.054	3934.045	0.000*
Sirke Emdirilmiş Filtre Uygulaması (B)	<i>L</i> *	88.549	1	88.549	318.590	0.000*
	<i>a</i> *	46.244	1	46.244	444.599	0.000*
	<i>b</i> *	104.821	1	104.821	512.326	0.000*
	<i>C</i> *	121.183	1	121.183	476.237	0.000*
Etkileşim (AB)	<i>L</i> *	1788.860	1	1788.860	1941.955	0.000*
	<i>a</i> *	525.406	11	47.764	171.850	0.000*
	<i>b</i> *	146.400	11	13.309	127.956	0.000*
	<i>C</i> *	241.153	11	21.923	107.151	0.000*
Hata	<i>L</i> *	228.027	11	20.730	81.466	0.000*
	<i>a</i> *	19558.759	11	1778.069	1930.241	0.000*
	<i>b</i> *	60.035	216	0.278		
	<i>C</i> *	22.467	216	0.104		
Toplam	<i>L</i> *	44.193	216	0.205		
	<i>a</i> *	54.963	216	0.254		
	<i>b</i> *	198.972	216	0.921		
	<i>C</i> *	803457.665	240			
Düzeltilmiş Toplam	<i>L</i> *	7935.533	240			
	<i>a</i> *	77314.702	240			
	<i>b</i> *	85233.913	240			
	<i>C</i> *	1316061.780	240			
Düzeltilmiş Toplam	<i>L</i> *	94946.651	239			
	<i>a</i> *	1368.849	239			
	<i>b</i> *	12239.423	239			
	<i>C</i> *	11415.770	239			
Düzeltilmiş Toplam	<i>L</i> *	55667.888	239			
	<i>a</i> *					
	<i>b</i> *					
	<i>C</i> *					

4. Sonuçlar

Çalışmada kullanılan beyaz sirke bütün tek ve çift komponentli parke vernikleri ile kaplanmış ahşap yüzeyler üzerinde renk parametrelerini değiştirmiştir.

Kaynaklar

- ASTM D 2244-3, (2007). Standard practice for calculation or color tolerances and color, differences from instrumentally measured color coordinates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 3023-98, (2017). Standard practice for determination of resistance of factory-applied coatings on wood products to stains and reagents. ASTM International.
- Douglas, S., Cole, J.B., Oakland, C.L., and Olives, T.D., (2025). Acute kidney failure from ingestion of “wood bleach” beekeeping miticide, The American Journal of Emergency Medicine, 90: 253-e1. DOI: 10.1016/j.ajem.2024.11.052.
- Farr, J.P., Smith, W.L., and Steichen, D.S., (2000). Bleaching agents. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. DOI: 10.1002/0471238961.1921182206011818.a01.pub2.
- Fu, Z., Zhou, F., Gao, X., Weng, X., and Zhou, Y., (2020). Assessment of mechanical properties based on the changes of chromatic values in heat treatment wood, Measurement, 152: 107215. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107215.
- Fu, Z., Zhou, Y., Gao, X., Liu, H., and Zhou, F., (2019). Changes of water related properties in radiata pine wood due to heat treatment, Construction and Building Materials, 227: 116692. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116692.

- Gennari, E., Picchio, R., and Lo Monaco, A., (2021). Industrial heat treatment of wood: study of induced effects on ayous wood (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum), *Forests*, 12(6): 730. DOI: 10.3390/f12060730.
- ISO 554, (1976). Standard atmospheres for conditioning and/or testing, International Standardization Organization, Geneva, Switzerland.
- Jirouš, R.V., and Ljuljka, B., (1999). Boja drva i njezine promjene prilikom izlaganja atmosferskim utjecajima, *Drvena Industrija*, 50(1): 31-39.
- Jones, D., Sandberg, D., Goli, G., and Todaro, L., (2019). Wood Modification in Europe: a state-of-the-art about processes, products and applications (p. 123). Firenze University Press. DOI: 10.36253/978-88-6453-970-6.
- Koubaa, A., (2007). Surface properties of oil finished hardwood floorings. ISCHP 07, September 24-26, 2007, 75-80.
- Lange, D.R., (1999). Fundamentals of Colourimetry - Application Report No. 10e. DR Lange: New York, NY, USA.
- Pavlič, M., Petrič, M., and Žigon, J., (2021). Interactions of coating and wood flooring surface system properties, *Coatings*, 11(1): 91. DOI: 10.3390/coatings11010091.
- Sykes, D., (2005). Wood innovations. *Polymers Paint Colour Journal*, 195(4484): 74-75.
- TS EN 12720+A1, (2015). Mobilya - Soğuk sıvılara karşı yüzey dayanıklılığının değerlendirilmesi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Williams, R.S., (1999). Finishing of wood. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General technical report FPL; GTR-113: Pages 15.1-15.37, 113.

PAMUK KUMAŞLARIN ZERDEÇAL TOZU VE ŞAP MADDESİYLE BOYANMASI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Arş. Gör. Dr. Keziban SELÇUK

Atatürk Üniversitesi, Oltu Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Grafik Tasarımı Pr., Oltu,
Erzurum, Türkiye

kselcuk@atauni.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-3460-4457

Doç. Dr. Ümit AYATA

*Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü,
Bayburt, Türkiye

*Sorumlu yazar: umitayata@yandex.com, ORCID ID: 0000-0002-6787-7822

Özet

Bu çalışmada, bir cam kap içerisinde (60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması) pamuk kumaşların(grup başına 1’er gr), farklı oranlarda şap maddesinin (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 gr) ve zerdeçal (*Curcuma longa* L.) bitkisine ait tozun (grup başına 1’er gr) kaynatılması ile elde edilen boyalı kumaşlar ile boyasız kumaşlar üzerinde ölçülen renk parametrelerindeki değişimleri araştırılmıştır. 7 farklı deney grubu örneği oluşturulmuştur. Malzeme 1 kontrol deney grubunu oluştururken, diğer malzemeler farklı oranlarda şap maddesini içeren boyanmış deney örneklerini temsil etmektedir. Şap maddesinin kullanılması ile ΔE^* değerlerinde ciddi oranlarda farklılıklar elde edilmiştir. Şap kullanılmayan pamuk kumaşı örnekleri ile şap kullanılan pamuk kumaşı örneklerine kıyasla ΔE^* değerleri 0.0 g şap ile 53.58, 0.5 g şap ile 74.12, 1.0 g şap ile 89.04, 1.5 g şap ile 77.55, 2.0 g şap ile 78.02 ve 2.5 g şap ile 86.79 şeklinde belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Pamuk kumaş, zerdeçal, şap, renk parametreleri, boyama

A Study on Dyeing Cotton Fabrics with Turmeric Powder and Alum

Abstract

This study investigated the changes in color parameters measured on dyed cotton fabrics (1 g per group), different ratios of alum (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 g), and turmeric (*Curcuma longa* L.) powder (1 g per group) obtained by boiling them in a glass container (at 100°C for 60 min) and on undyed fabrics. Seven different experimental groups were created. Material 1 constituted the control group, while the other materials represented dyed experimental samples containing different ratios of alum. Significant differences in ΔE^* values were obtained with the use of alum. The ΔE^* values were determined as follows when comparing cotton fabric samples without alum to cotton fabric samples with alum: 0.0 g alum: 53.58, 0.5 g alum: 74.12, 1.0 g alum: 89.04, 1.5 g alum: 77.55, 2.0 g alum: 78.02, and 2.5 g alum: 86.79.

Keywords: Cotton fabric, turmeric, alum, color parameters, dyeing

1. Giriş

Boyama, eski çağlardan beri uygulanmış ve günümüzdeki gelişimine ulaşana kadar birçok değişime uğramıştır. İlk dönemlerde tekstiller bitki ve hayvansal kaynaklar kullanılarak boyanırken, sentetik boyaların ortaya çıkmasıyla birlikte, sentetik boyalar çeşitli ton ve renkler verdiğinden, tekstillerde doğal boyaların kullanımı ortadan kalktığı bildirilmiştir (Deo ve Desai, 1999; Bhatti ve ark., 2010).

Doğal ürünlerin çok çeşitli uygulamaları vardır. Bazıları ilaç olarak kullanılırken, diğerleri önemli biyolojik özelliklere sahiptir veya besin takviyesi, boya, aroma verici madde veya kozmetik endüstrisinde içerik maddesi olarak kullanılmaktadır (Cordell, 2002; Balaji ve Chempakam, 2010).

Safran, kırmızıbiber, zerdeçal, pancar ekstraktı ve yaprakları doğal renklendiricilerdir. Doğal renklendiriciler eskiden olduğu gibi kullanıldığı bildirilmiştir. Pancar suyu, beta-karoten, yaban mersini suyu konsantresi, havuç suyu, üzüm kabuğu özütü, kırmızıbiber, mor tatlı patates veya mısır, kırmızılaha ve zerdeçal çok çeşitli renkler üretmek için kullanılabilir. Doğal boyalar genellikle yüksek kalite standartlarıyla sağlanmaktadır ve doğal boyalarda, yapay boyalarda sıklıkla bulunan yoğun renklendirici maddeler bulunmaz. Doğal kaynaklı renklendiriciler, renklendirici özelliklerinin yanı sıra tıbbi değere de sahip oldukları bildirilmiştir (Delgado-Vargas ve Paredes-Lopez, 2003).

Zerdeçal (*Curcuma longa* L.), aromatik rizomları için yetiştirilen önemli bir ticari üründür. Zerdeçal, M.Ö. 4000 yılından beri baharat, koruyucu ve bazı hastalıkların tedavisinde geleneksel tıp olarak kullanılmaktadır. Hindistan en büyük zerdeçal üreticisi, ithalatçısı ve ihracatçısıdır. Bununla birlikte, birçok diğer Asya, Latin Amerika ve Karayip ülkesi de artık zerdeçal üretmektedir. Küresel zerdeçal üretimi yaklaşık 1.100.000 ton/yıl'dır (Nair, 2013; Osorio-Tobon ve ark., 2014).

Zerdeçal, Zingiberaceae familyasından otsu, her dem yeşil bir bitkidir. Asya'da, özellikle Hindistan ve Çin'de yaygın olarak yetiştirilmektedir. Muhtemelen Hindistan kökenli olan zerdeçal, Hindistan'da en az 2500 yıldır kullanılmaktadır (Kapoor, 2000; Verma ve ark., 2018). Bu bitki, 1 metreye kadar boylanabilen, kısa saplı, çok yıllık bir bitkidir. Dünyanın tropikal ve subtropikal bölgelerinde yaygın olarak yetiştirilmektedir ve Asya ülkelerinde, özellikle Hindistan ve Çin'de yaygın olarak yetiştirilmektedir. Hindistan'da halk arasında "Haldi" olarak bilinmektedir; Malezya, Endonezya ve Hindistan'da ekonomik önemi nedeniyle iyi incelenmiştir. Rizomları dikdörtgen, oval, piramit şeklinde ve genellikle kısa dallıdır ve Nepal'de evlerde kullanılan bir ilaçtır (Eigner ve Scholz, 1999; Araujo ve Leon, 2001).

Geleneksel olarak karaciğer tıkanıklığı, iltihaplanma, ülser, sarılık, dizanteri, taze yaralar, diyabet, mide rahatsızlıkları, böcek sokmaları ve suçiçeği ve çiçek hastalığı gibi viral enfeksiyonlar gibi çeşitli hastalıkların/rahatsızlıkların tedavisinde kullanıldığı bildirilmiştir (Nadkarni, 1976; Abbas ve ark., 2010).

Boya maddesi olarak kullanımı nedeniyle zerdeçal toz halinde saklanmaktadır ve pazarlanmaktadır. Rizomun toz haline getirilmesi kurutma yoluyla yapılmaktadır ve bu işlem, nem içeriğini ve su aktivitesini azaltarak ürünün raf ömrünü uzatmaya katkıda bulunmaktadır. Bu da mikroorganizmaların gelişme olasılığını azaltmaktadır ve rizomun özelliklerini etkileyebilecek fiziksel, kimyasal ve duyuşsal reaksiyon olasılığını en aza indirmektedir (Lima ve ark., 2022; Siqueira-de-Lima ve ark., 2024).

Zerdeçalın renginden sorumlu olan kurkuminoid içeriği, zerdeçal çeşidine ve aynı çeşit içinde hasat zamanındaki olgunluğuna bağlıdır. Zerdeçalda %3-5 oranında bulunabilmektedir ve doğru olgunlukta hasat edilmesi, optimum renk ve aroma için önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir (Umbreen ve ark., 2008).

Bu çalışmada, bir cam kap içerisinde pamuk kumaşların, farklı oranlarda şap maddesinin ve zerdeçal (*Curcuma longa* L.) bitkisine ait tozun kaynatılması ile elde edilen boyalı kumaşlar ile boyasız kumaşların renk parametrelerinde meydana gelen değişimleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, pamuk kumaşlar, bir kumaş satıcısından, şap maddesi ve zerdeçal (*Curcuma longa* L.) tozu ise bir aktardan satın alınma yöntemi ile temin edilmiştir.

Deneyisel tasarım aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

Malzeme 1: Kontrol (herhangi bir boyama uygulaması işlemi yapılmamıştır),

Malzeme 2: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,

Malzeme 3: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,

Malzeme 4: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,

Malzeme 5: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.

Malzeme 6: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.

Malzeme 7: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.

Boyanmış ve boyanmamış pamuk kumaşlar üzerinde renk parametreleri bir standart kullanılarak (ASTM D 2244-3, 2007) ölçülmüştür. Aşağıdaki formüller ile toplam renk farklılıkları hesaplanmıştır.

$$\Delta H^* = [(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{0.5} \quad (1)$$

$$\Delta a^* = (a^* \text{ işlem uygulanmış deney örneği}) - (a^* \text{ işlem uygulanmamış}) \quad (2)$$

$$\Delta L^* = (L^* \text{ işlem uygulanmış deney örneği}) - (L^* \text{ işlem uygulanmamış}) \quad (3)$$

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0.5} \quad (4)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{0.5} \quad (5)$$

$$\Delta C^* = (C^* \text{ işlem uygulanmış deney örneği}) - (C^* \text{ işlem uygulanmamış}) \quad (6)$$

$$h^0 = \arctan (b^*/a^*) \quad (7)$$

$$\Delta b^* = (b^* \text{ işlem uygulanmış deney örneği}) - (b^* \text{ işlem uygulanmamış}) \quad (8)$$

Çizelge 1’de Δa^* , ΔL^* , Δb^* ve ΔC^* değerleri hakkında (Lange, 1999) ve Jirouš ve Ljuljka, (1999)’ya göre renk değişim aralığı hakkında bazı önemli bilgiler gösterilmektedir.

Çizelge 1. Renk parametreleri ile ilgili önemli bilgiler

ΔL^* , Δa^* , Δb^* ve ΔC^* (Lange, 1999)	Parametre	Pozitif durumda		Negatif durumda
	Δb^*	Referansa göre daha sarı		Referansa göre daha mavi
	Δa^*	Referansa göre daha kırmızı		Referansa göre daha yeşil
	ΔC^*	Referansa göre, daha net ve daha parlak		Mat, referansa göre daha bulanık
	ΔL^*	Referansa göre daha açık		Referansa göre daha koyu
Jirouš ve Ljuljka, (1999) renk aralığı	ΔE^* aralığı	Renk değişim tahmini	ΔE^* aralığı	Renk değişim tahmini
	< 0.20	Anlaşılmaz	3.00 - 6.00	Çok belirgin
	0.20 - 0.50	Çok hafif	6.00 - 12.00	Yoğun
	0.50 - 1.50	Hafif	> 12.00	Çok yoğun
	1.50 - 3.00	Belirgin		

Bir istatistik programı ile en düşük ve en yüksek veriler, varyans analizleri, ortalamalar, standart sapma, % değişim oranları ve homojenlik grupları hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Renk parametrelerine ait belirlenmiş ölçüm sonuçları Çizelge 2’de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Renk parametrelerine ait belirlenmiş ölçüm sonuçları

Test	Malzeme Türü	Zerdeçal Tozu (gr)	Şap Miktarı (gr)	Ortalama	Değişim Oranı (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
L*	Malzeme 1	0.0	0.0	84.79	-	A*	0.05	84.71	84.86	0.06
	Malzeme 2	1.0	0.0	74.84	↓11.73	B	0.07	74.68	74.95	0.10
	Malzeme 3	1.0	0.5	73.56	↓13.24	D**	0.09	73.40	73.69	0.13
	Malzeme 4	1.0	1.0	73.93	↓12.81	C	0.24	73.68	74.31	0.33
	Malzeme 5	1.0	1.5	73.65	↓13.14	CD	0.23	73.21	73.93	0.31
	Malzeme 6	1.0	2.0	73.58	↓13.22	D	0.39	72.59	73.84	0.53
	Malzeme 7	1.0	2.5	73.63	↓13.16	CD	0.65	72.61	74.23	0.89
a*	Malzeme 1	0.0	0.0	-0.93	-	E**	0.06	-1.03	-0.85	-6.97
	Malzeme 2	1.0	0.0	5.89	↑733.33	A*	0.05	5.81	5.99	0.81
	Malzeme 3	1.0	0.5	4.33	↑565.59	D	0.18	4.13	4.63	4.26
	Malzeme 4	1.0	1.0	4.61	↑595.70	C	0.27	4.16	4.90	5.81
	Malzeme 5	1.0	1.5	4.89	↑625.81	C	0.15	4.68	5.11	3.10
	Malzeme 6	1.0	2.0	5.37	↑677.42	B	0.31	5.15	6.19	5.77
	Malzeme 7	1.0	2.5	4.83	↑619.35	C	0.65	4.20	5.79	13.45
b*	Malzeme 1	0.0	0.0	2.67	-	F**	0.08	2.58	2.82	2.98
	Malzeme 2	1.0	0.0	54.87	↑1955.06	E	0.72	54.22	56.38	1.32
	Malzeme 3	1.0	0.5	75.74	↑2736.70	D	0.40	75.17	76.34	0.52
	Malzeme 4	1.0	1.0	90.87	↑3303.37	A*	1.40	88.72	92.09	1.54
	Malzeme 5	1.0	1.5	79.19	↑2865.92	C	0.83	78.35	80.60	1.05
	Malzeme 6	1.0	2.0	79.62	↑2882.02	C	0.41	79.13	80.26	0.52
	Malzeme 7	1.0	2.5	88.54	↑3216.10	B	1.74	86.03	90.83	1.97
C*	Malzeme 1	0.0	0.0	2.83	-	F**	0.09	2.72	2.98	3.09
	Malzeme 2	1.0	0.0	55.19	↑1850.18	E	0.72	54.54	56.70	1.31
	Malzeme 3	1.0	0.5	75.85	↑2580.21	D	0.41	75.28	76.48	0.55
	Malzeme 4	1.0	1.0	90.99	↑3115.19	A*	1.41	88.81	92.22	1.55
	Malzeme 5	1.0	1.5	79.35	↑2703.89	C	0.83	78.50	80.75	1.05
	Malzeme 6	1.0	2.0	79.86	↑2721.91	C	0.42	79.30	80.44	0.52
	Malzeme 7	1.0	2.5	88.67	↑3033.22	B	1.70	86.22	90.93	1.92
h°	Malzeme 1	0.0	0.0	109.32	-	A*	1.06	108.17	111.36	0.97
	Malzeme 2	1.0	0.0	83.87	↓23.28	E**	0.05	83.78	83.95	0.06
	Malzeme 3	1.0	0.5	86.73	↓20.66	BC	0.12	86.53	86.86	0.14
	Malzeme 4	1.0	1.0	87.10	↓20.33	B	0.13	86.95	87.31	0.14
	Malzeme 5	1.0	1.5	86.47	↓20.90	CD	0.09	86.32	86.60	0.11
	Malzeme 6	1.0	2.0	86.15	↓21.19	D	0.21	85.58	86.30	0.24
	Malzeme 7	1.0	2.5	86.87	↓20.54	BC	0.48	86.20	87.35	0.55
Malzeme 1: Kontrol (herhangi bir boyama işlemi yapılmamıştır), Malzeme 2: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 3: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 4: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 5: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması. Malzeme 6: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması. Malzeme 7: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması. Homojenlik Grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç, Ölçüm Sayısı: 10										

Herhangi bir boyama uygulaması yapılmamış kumaşlarla mordanlı ve mordansız deney örnekleri kıyaslandığında, L* (mordansız boyama ile %11.73 ve mordanlı boyamalar ile %12-13 arasında) ve h° (mordansız boyama ile %23.28 ve mordanlı boyamalar ile %20-21 arasında) değerlerinde azalışların olduğu tespit edilirken, a* (mordansız boyama ile %733 ve mordanlı

boyamalar ile %565-677 arasında), C^* (mordansız boyama ile %1850 ve mordanlı boyamalar ile %2580-3115 arasında), ve b^* (mordansız boyama ile %1955 ve mordanlı boyamalar ile %2736-3303 arasında) değerlerinde artışların olduğu belirlenmiştir. En yüksek sonuçlar h^0 ve L^* parametresinde kontrol deney örneklerinde bulunurken, en düşük sonuçlar ise C^* , b^* ve a^* parametresinde yine kontrol deney örneklerinde tespit edilmiştir (Çizelge 2).

Renk parametrelerine ait varyans analizi sonuçları Çizelge 3’de verilmiştir. Bütün renk parametrelerinde malzeme türünün anlamlı olarak elde edildiği görülmüştür (Çizelge 3).

Çizelge 3. Varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Test	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Malzeme Türü	L^*	1036.309	6	172.718	1712.584	0.000*
	a^*	315.723	6	52.621	565.095	0.000*
	b^*	57029.632	6	9504.939	10180.511	0.000*
	C^*	56971.023	6	9495.170	10289.277	0.000*
	h^0	4654.485	6	775.748	3750.138	0.000*
Hata	L^*	6.354	63	0.101		
	a^*	5.866	63	0.093		
	b^*	58.819	63	0.934		
	C^*	58.138	63	0.923		
	h^0	13.032	63	0.207		
Toplam	L^*	399269.315	70			
	a^*	1520.368	70			
	b^*	374663.909	70			
	C^*	376274.535	70			
	h^0	565406.497	70			
Düzeltilmiş Toplam	L^*	1042.663	69			
	a^*	321.590	69			
	b^*	57088.452	69			
	C^*	57029.161	69			
	h^0	4667.517	69			
Malzeme 1: Kontrol (herhangi bir boyama işlemi yapılmamıştır), Malzeme 2: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 3: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 4: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 5: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 6: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 7: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.						

Toplam renk farklılıklarına ait sonuçları Çizelge 4’de verilmiştir. ΔE^* değerlerinde elde edilen farklılıklar şap maddesinin kullanılması ile elde edilmiştir. Şap kullanılmayan örnekler ile şap kullanılan örneklerle kıyasla 0.5 gr şap ile %38.34, 1.0 gr şap ile %66.18, 1.5 gr şap ile %44.74, 2.0 gr şap ile %45.61 ve 2.5 gr şap ile %61.98 oranlarında artış verilerine ulaşılmıştır. Bütün mordanlı ve mordansız deney örneklerinde ölçülen değerler sonrasında yapılan hesaplamalar ile Δa^* değerlerinin pozitif elde edilmesi ile referansa göre daha kırmızı sonucuna, Δb^* değerlerinin pozitif elde edilmesi ile referansa göre daha sarı sonucuna, ΔC^* değerlerinin pozitif elde edilmesi ile referansa göre, daha net ve daha parlak sonucuna ve ΔL^* değerlerinin negatif elde edilmesi ile de referansa göre daha açık sonucuna ulaşıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, renk kriteri (Jirouš ve Ljuljka, 1999) açısından bütün mordanlı ve mordansız deney örneklerinde “çok yoğun (> 12.00)” kriterinin elde edildiği de görülmektedir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Toplam renk farklılıklarına ait sonuçları

Uygulama Üzerindeki Farklılıkların Sonuçları			ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*	Renk kriteri (Jirouš ve Ljuljka, 1999)
Malzeme Türü	Zerdeçal Tozu (gr)	Şap Miktarı (gr)							
Malzeme 2	1.0	0.0	-9.96	6.82	52.21	52.36	5.50	53.58	Çok yoğun (> 12.00)
Malzeme 3	1.0	0.5	-11.23	5.26	73.08	73.03	5.87	74.12	
Malzeme 4	1.0	1.0	-10.87	5.54	88.20	88.16	6.18	89.04	
Malzeme 5	1.0	1.5	-11.15	5.82	76.53	76.52	5.92	77.55	
Malzeme 6	1.0	2.0	-11.22	6.30	76.95	77.04	5.16	78.02	
Malzeme 7	1.0	2.5	-11.16	5.76	85.87	85.85	6.13	86.79	
Malzeme 2: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,									
Malzeme 3: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,									
Malzeme 4: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,									
Malzeme 5: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.									
Malzeme 6: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.									
Malzeme 7: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.									

4. Sonuçlar

Çalışmada kullanılan şap ve zerdeçal tozu maddelerinin pamuklu kumaşlar için renk parametreleri üzerinde değişimlere neden olduğu belirlenmiştir.

Kaynaklar

- Abbas, R.Z., Iqbal, Z., Khan, M.N., Zafar, M.A., and Zia, M.A., (2010). Anticoccidial activity of *Curcuma longa* L. in broilers, Brazilian Archives of Biology and Technology, 53: 63-67. DOI: 10.1590/S1516-89132010000100008.
- Araujo, C.A.C., and Leon, L.L., (2001). Biological activities of *Curcuma longa* L., Memórias do Instituto Oswaldo Cruz, 96: 723-728. DOI: 10.1590/S0074-02762001000500026.
- ASTM D 2244-3, (2007). Standard practice for calculation or color tolerances and color, differences from instrumentally measured color coordinates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Balaji, S., and Chempakam, B., (2010). Toxicity prediction of compounds from turmeric (*Curcuma longa* L), Food and Chemical Toxicology, 48(10): 2951-2959. DOI: 10.1016/j.fct.2010.07.032.
- Bhatti, I.A., Adeel, S., Jamal, M.A., Safdar, M., and Abbas, M., (2010). Influence of gamma radiation on the colour strength and fastness properties of fabric using turmeric (*Curcuma longa* L.) as natural dye, Radiation Physics and Chemistry, 79(5): 622-625. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2009.12.006.
- Cordell, G.A., (2002). Natural products in drug discovery—creating a new vision. Phytochemistry Reviews, 1(3): 261-273. DOI: 10.1023/A:1026094701495.
- Delgado-Vargas, F., and Paredes-Lopez, O., (2003). Natural colorants for food and nutraceutical uses, CRC press. DOI: 10.1201/9781420031713.
- Deo, H.T., and Desai, B.K., (1999). Dyeing of cotton and jute with tea as a natural dye, Coloration Technology, 115(7-8): 224-227. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1999.tb00360.x.
- Eigner, D., and Scholz, D., (1999). Ferula asa-foetida and Curcuma longa in traditional medical treatment and diet in Nepal, Journal of Ethnopharmacology, 67(1): 1-6. DOI: 10.1016/S0378-8741(98)00234-7.

- Jirouš, R.V., and Ljuljka, B., (1999). Boja drva i njezine promjene prilikom izlaganja atmosferskim utjecajima, *Drvena Industrija*, 50(1): 31-39.
- Kapoor, L.D., (2000). *Handbook of Ayurvedic Medicinal Plants*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Lange, D.R., (1999). *Fundamentals of Colourimetry - Application Report No. 10e*. DR Lange: New York, NY, USA.
- Lima, M.S.D., resende, O., Placido, G.R., Silva, J.A.G.E., Celia, J.A., Caliari, M., de Oliveira, D.E.C., Correia, J.S., and Silva, M.A.P.D., (2022). Effects of drying temperature on the bioactive and technological properties of turmeric (*Curcuma longa* L.) flour, *Food Science and Technology*, 42: e76122. DOI: 10.1590/fst.76122.
- Nadkarni, K.M. (1976), *Indian Materia Medica*, Popular Prakashan: Bombay, pp. 850-854.
- Nair, K.P., (2013). *The agronomy and economy of turmeric and ginger: the invaluable medicinal spice crops*. Newnes.
- Osorio-Tobon, J.F., Carvalho, P.I., Rostagno, M.A., Petenate, A.J., and Meireles, M.A.A., (2014). Extraction of curcuminoids from deflavored turmeric (*Curcuma longa* L.) using pressurized liquids: Process integration and economic evaluation,. *The Journal of Supercritical Fluids*, 95: 167-174. DOI: 10.1016/j.supflu.2014.08.012.
- Ramesh, M., and Muthuraman, A., (2018). Flavoring and coloring agents: Health risks and potential problems, In *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes* (pp. 1-28). Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-811518-3.00001-6.
- Siqueira-de-Lima, M., Cagnin, C., Borges-Machado, A.L., Ribeiro-Sanches, M.A., Telis-Romero, J., and Resende, O., (2024). Thermodynamic approach on water vapor sorption of *Curcuma longa* L. Flour, *LWT*, 206, 116592. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116592.
- Umbreen, S., Ali, S., Hussain, T., and Nawaz, R., (2008). Dyeing properties of natural dyes extracted from turmeric and their comparison with reactive dyeing, *Research Journal of Textile and Apparel*, 12(4): 1-11. DOI: 10.1108/RJTA-12-04-2008-B001.
- Verma, R.K., Kumari, P., Maurya, R.K., Kumar, V., Verma, R.B., and Singh, R.K., (2018). Medicinal properties of turmeric (*Curcuma longa* L.): A review, *International Journal of Chemical Studies*, 6(4): 1354-1357.

ADAPTIVE REUSE OF HISTORICAL BUILDINGS IN BAKU: CONTEMPORARY CHALLENGES AND INNOVATIVE SOLUTIONS

Prof. Dr. Kamran Guliyev

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Azerbaijan

Leyla Mammadova

Baku State University, Azerbaijan

Abstract

This paper explores the current landscape of adaptive reuse projects involving historical buildings in Baku, a city known for its layered architectural heritage. It investigates the strategies and challenges faced by architects, developers, and conservationists when converting old structures into functional contemporary spaces while preserving cultural and historical value. Qualitative research, including interviews with architects and site analyses, reveals that Baku's rapid economic development and expansion have led to an increased demand for new uses for obsolete or underutilized buildings. However, historic preservation regulations, urban zoning laws, and technical issues such as structural retrofitting present major barriers. Successful projects showcase creative approaches to structural reinforcement, incorporation of modern amenities, and community engagement processes that honor both tradition and innovation. The study concludes that adaptive reuse, when rooted in context-sensitive design, contributes significantly to urban sustainability, cultural continuity, and city identity. Policy recommendations emphasize the need for clearer preservation guidelines, interdisciplinary collaboration, and public education campaigns to foster appreciation and support for adaptive reuse among both stakeholders and the wider population.

Keywords: adaptive reuse, Baku, historical buildings, urban sustainability, cultural heritage

INTEGRATING TRADITIONAL AZERBAIJANI DESIGN PRINCIPLES INTO CONTEMPORARY URBAN HOUSING

Assoc. Prof. Dr. Elvin Hasanov

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Azerbaijan

Nigar Suleymanli

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Azerbaijan

Farid Gasimov

Baku Engineering University, Azerbaijan

Abstract

This study examines the incorporation of traditional Azerbaijani architectural elements—such as courtyard planning, decorative tilework, and local materials—into new urban housing projects. Through field surveys and case studies, the authors analyze both the aesthetic and practical impacts of these design choices, addressing how cultural continuity and innovation can coexist within Baku’s fast-evolving urban fabric. The research finds that projects integrating indigenous design promote stronger community ties, foster passive climate adaptation, and create distinctive local identities amid global architectural trends. However, challenges such as limited material availability and cost constraints persist. The paper advocates for strengthening design curricula with vernacular knowledge and encouraging policy reforms that incentivize culturally rooted architecture. Ultimately, the research underscores the value of combining tradition and modernity in addressing the housing needs of a dynamic population.

Keywords: Azerbaijani architecture, urban housing, traditional design, cultural continuity, vernacular

SUSTAINABLE FLOOD-RESISTANT ARCHITECTURE FOR BANGLADESH'S GROWING DELTA REGIONS

Dr. Mustafa Rahman

Bangladesh University of Engineering and Technology, Bangladesh

Assis. Prof. Dr. Nabila Hasan

University of Dhaka, Bangladesh

Tariq Chowdhury

Ahsanullah University of Science and Technology, Bangladesh

Samia Akhtar

Chittagong University of Engineering and Technology, Bangladesh

Abstract

With climate change intensifying monsoonal flooding and sea-level rise, the need for innovative flood-resistant architecture in Bangladesh has become critical. This paper investigates sustainable design strategies for housing in deltaic regions, where vulnerability to water is a daily reality. The researchers review traditional stilt and floating structures as well as new material technologies and passive water management solutions. Fieldwork, community feedback, and simulation analyses demonstrate the benefits and limitations of each system. Notably, vernacular approaches—modified through the integration of engineered solutions—emerge as both culturally appropriate and cost-effective. The research calls for participatory design processes, hybrid construction models, and government incentives to promote wider adoption of resilient building practices. Future directions include digital modeling of hydrological impacts and more robust collaboration between engineers, architects, and end-users.

Keywords: flood-resistant architecture, sustainable design, Bangladesh, climate adaptation, delta regions

**URBAN DENSIFICATION AND GREEN SPACE PRESERVATION IN DHAKA:
DESIGN STRATEGIES AND POLICY APPROACHES**

Prof. Dr. Sharmin Akter

Bangladesh University of Engineering and Technology, Bangladesh

Dr. Nusrat Jahan

University of Asia Pacific, Bangladesh

Abstract

This research addresses the ongoing challenge of balancing urban densification and green space preservation in Dhaka, one of the world's fastest-growing megacities. Through GIS mapping, urban design simulations, and stakeholder interviews, the authors highlight the dangers of unchecked vertical expansion and the resulting ecological imbalances. They examine international and local case studies, suggesting design strategies such as urban parks, vertical greening, and interconnected open spaces as viable interventions. The analysis emphasizes the importance of policy frameworks and community participation for successful green space integration. The study concludes with recommendations for adaptive urban regulations, sustainable landscape planning, and public awareness initiatives to achieve long-term ecological and social resilience in Dhaka.

Keywords: urban densification, green spaces, Dhaka, landscape planning, policy

INTEGRATING MODULAR CONSTRUCTION WITH MALAYSIAN VERNACULAR ARCHITECTURE: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Prof. Dr. Ahmad Rashid
Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia
Farah Nazirah Ramli
Universiti Teknologi MARA, Malaysia
Assis. Prof. Dr. Lim Sze Wee
Universiti Malaya, Malaysia

Abstract

This paper explores the intersection of modular construction technologies and traditional Malaysian vernacular design. Focusing on residential projects, the authors analyze both the technical feasibility and the cultural reception of integrating modularity with features such as intricate woodwork, raised platforms, and open-plan layouts. Case studies and interviews with industry professionals reveal that modular methods can significantly reduce construction waste, time, and costs. Yet, issues around architectural authenticity, regulatory barriers, and skilled labor persist. The research advocates for formalized guidelines and collaborative educational programs to bridge the knowledge gap between modern construction and heritage preservation. Engaging communities in the co-design process is highlighted as key to successful implementation, fostering a sense of ownership and continuity.

Keywords: modular construction, Malaysian architecture, vernacular, heritage, innovation

**TROPICAL ENVIRONMENTAL RESPONSIVENESS IN MALAYSIAN
UNIVERSITY CAMPUS DESIGN**

Assoc. Prof. Dr. Zainab Johari

Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

Harris bin Abdullah

Universiti Sains Malaysia, Malaysia

Dr. Amelia Lee

Universiti Malaya, Malaysia

Abstract

With rising temperatures and increasingly erratic weather, Malaysian university campuses must address environmental challenges through innovative design. This research investigates recent campus projects and retrofits that prioritize natural ventilation, daylighting, and stormwater management. Surveys of students and staff point to increased comfort, reduced energy costs, and improved academic performance resulting from these strategies. The paper also details material sourcing and construction methods that minimize ecological footprints while respecting regional identities. Collaboration between architects, engineers, and environmental scientists emerges as a key success factor. Policy recommendations include integrating environmental responsiveness into university accreditation and increasing funding for pilot projects that showcase best practices for sustainable campus design.

Keywords: campus design, environmental responsiveness, Malaysia, sustainable architecture, tropical climates

**REHABILITATION OF OTTOMAN-ERA BUILDINGS IN SKOPJE: HISTORICAL
ANALYSIS AND CONTEMPORARY CONSERVATION**

Dr. Elena Dimitrova
Prof. Dr. Nikola Jovanovic
Selma Ismaili
Bojan Petrovski

Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia

Abstract

This study examines the rehabilitation efforts of Ottoman-era buildings in Skopje, highlighting the tension between preserving historical authenticity and accommodating new uses. Using archival research, site analysis, and interviews with conservators, the paper evaluates the methods and materials employed in recent restoration projects. The findings reveal both successes—such as the reactivation of historic neighborhoods and tourism growth—and challenges, including resource scarcity, regulatory inconsistencies, and the impact of modern interventions on original fabric. The authors advocate for evidence-based guidelines, capacity-building among professionals, and community involvement to sustain the city's unique heritage amid urban modernization. Special focus is given to cross-border collaborations and EU funding mechanisms supporting heritage conservation in the Balkans.

Keywords: building rehabilitation, Ottoman heritage, Skopje, conservation, historic authenticity

**URBAN TRANSFORMATION AND SOCIAL INCLUSION IN POST-SOCIALIST
SKOPJE: PUBLIC SPACE REDESIGN**

Assoc. Prof. Dr. Danilo Milanovic
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia
Assis. Prof. Dr. Marija Pavlovska
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia
Ana Petreski
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia

Abstract

This article explores the role of public space redesign in fostering social inclusion during Skopje's ongoing urban transformation. Through mixed-methods research, the study analyzes case studies of renovated parks, pedestrian zones, and riverside promenades. Surveys and interviews with diverse residents illuminate shifts in usage patterns, perceptions of safety, and accessibility for vulnerable groups. The authors highlight how participatory planning, artistic interventions, and community events have created spaces of dialogue and mutual recognition. However, they also identify limitations due to bureaucratic hurdles and political contestation. The study concludes that inclusive public space design is vital for healing social divisions and enhancing urban quality of life, recommending greater transparency and democratic engagement in the urban planning process.

Keywords: urban transformation, public space, Skopje, social inclusion, participatory design

RENEWABLE ENERGY INTEGRATION IN SMART GRIDS: CHALLENGES AND SOLUTIONS IN PAKISTAN

Prof. Dr. Imran Malik

National University of Sciences and Technology (NUST), Pakistan

Dr. Tayyaba Zahid

University of Engineering and Technology Lahore, Pakistan

Dr. Bilal Hussain

National University of Sciences and Technology (NUST), Pakistan

Abstract

Focused on Pakistan's evolving energy sector, this paper investigates the integration of renewable energy sources into national smart grids. Employing technical analysis, power flow simulations, and case studies from solar and wind farm projects, the research examines technical challenges such as intermittency, storage limitations, and grid synchronization. The analysis demonstrates how advanced control systems, real-time forecasting, and distributed energy management can overcome operational barriers. Results suggest that policy frameworks, targeted investments, and capacity-building initiatives are fundamental for scaling renewables while maintaining grid stability. The study provides actionable recommendations for policymakers and grid operators, advocating for a diversified, sustainable, and resilient power infrastructure in Pakistan.

Keywords: renewable energy, smart grid, Pakistan, grid synchronization, distributed management

DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR FAULT DETECTION IN HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION LINES

Dr. Maryam Qureshi
NED University of Engineering and Technology, Pakistan
Assis. Prof. Dr. Sheraz Ahmed
COMSATS University Islamabad, Pakistan

Abstract

This paper presents the application of deep learning models for automated fault detection in high-voltage transmission lines. Using actual grid data, the research compares convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs) for pattern recognition in waveform analysis. Experimental results demonstrate that deep learning methods outperform traditional models in detection accuracy, speed, and false positive reduction. Challenges identified include requirements for large training datasets, model interpretability, and integration with existing SCADA systems. The findings highlight the remarkable potential of AI-based solutions for advancing grid reliability, safety, and predictive maintenance in developing energy systems.

Keywords: deep learning, fault detection, transmission lines, AI, predictive maintenance

PHOTOVOLTAIC SYSTEM PERFORMANCE OPTIMIZATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN EGYPTIAN DESERTS

Prof. Dr. Ahlam Abdelrahman

Cairo University, Egypt

Dr. Mostafa Khalil

Cairo University, Egypt

Assis. Prof. Dr. Mariam Fouad

Alexandria University, Egypt

Nada El-Din

Mansoura University, Egypt

Abstract

This research examines the optimization of photovoltaic (PV) system performance in Egypt's desert environments using artificial intelligence. Through experimental deployment and simulation models, neural networks and genetic algorithms are utilized for maximum power point tracking (MPPT), fault diagnostics, and predictive maintenance. Field data show substantial gains in system efficiency and reliability under variable climate conditions. The study addresses practical challenges such as dust accumulation, temperature variability, and equipment aging, proposing hybrid AI-based algorithms for robust control. The authors recommend integrating these technologies into Egypt's national renewable energy plan to meet growing electricity demand with low-carbon sources, positioning the country as a leader in sustainable solar power solutions.

Keywords: photovoltaic systems, Egypt, artificial intelligence, solar energy, performance optimization

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SMART ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE IN CAIRO

Assis. Prof. Dr. Youssef Amin
Ain Shams University, Egypt
Dr. Hoda Samir
The American University in Cairo, Egypt

Abstract

This paper details the systematic design and pilot deployment of smart electric vehicle (EV) charging stations across Cairo. The research includes grid integration studies, real-time data analytics, and economic modeling to determine optimal infrastructure placement. Solutions for peak load management, billing, and driver accessibility are analytically evaluated. Results indicate significant reductions in charging times, balanced load profiles, and improved grid sustainability. Policy implications are discussed regarding incentives, urban planning, and public acceptance. The project illustrates how smart infrastructure can support growing EV adoption, reduce urban pollution, and contribute to Egypt's sustainable transportation future.

Keywords: electric vehicles, smart charging, Egypt, grid integration, sustainable transport

ANALYSIS OF MICROGRID STABILITY UNDER VARIABLE LOAD AND GENERATION CONDITIONS IN KABUL

Dr. Parwiz Hashimi
Kabul University, Afghanistan

Abstract

This study explores the stability and performance of microgrids in Kabul under fluctuating load demands and intermittent renewable generation common to off-grid and rural settings. Using simulation tools and real-time monitoring of local microgrid installations, metrics such as frequency deviation, voltage regulation, and fault tolerance are assessed. The analysis identifies vulnerabilities in protection schemes and underscores the need for adaptive energy management systems. Recommendations include advanced inverter controls, battery integration, and technical training for operators. The paper demonstrates that strategic enhancements can boost energy reliability for communities with limited grid connectivity, supporting Afghanistan's national energy access goals.

Keywords: microgrid stability, Afghanistan, variable load, renewable energy, voltage regulation

EFFICIENT POWER CONVERTER DESIGN FOR RURAL ELECTRIFICATION IN AFGHANISTAN

Prof. Dr. Laila Saidi

Polytechnic University of Kabul, Afghanistan

Assis. Prof. Dr. Mohammad Rahmani

Polytechnic University of Kabul, Afghanistan

Dr. Zainab Nazari

Bamyan University, Afghanistan

Ali Asadi

Kabul University, Afghanistan

Abstract

This research investigates the development of efficient, low-cost power converters designed to improve rural electrification initiatives in Afghanistan. The team presents novel converter topologies with enhanced conversion efficiency, thermal stability, and component minimization, validated through laboratory and field testing. Simulations focus on reliability under poor grid conditions and integration with renewable sources. The paper underscores the importance of local manufacturing capacity, maintenance training, and suitable technical standards. Outcomes suggest that advanced converter systems are foundational to bridging the rural-urban electricity divide, and the study offers policy and development suggestions for sustainable expansion.

Keywords: power converters, Afghanistan, rural electrification, energy efficiency, converter design

WIRELESS COMMUNICATION FRAMEWORKS FOR REMOTE HEALTH MONITORING IN RURAL AFGHANISTAN

Dr. Ahmad Fahim
Bamyan University, Afghanistan
Niloofar Qaderi
Herat University, Afghanistan

Abstract

This paper assesses wireless communication networks for remote health monitoring systems serving isolated Afghan communities. The study designs and evaluates low-power, long-range wireless solutions for data transmission between wearable health sensors and central medical facilities. Field results in several rural districts demonstrate increased patient tracking and timely healthcare responses even in areas lacking reliable grid power and telecommunications. Barriers pertaining to device affordability, network reliability, and digital literacy are discussed alongside feasible strategies for community training and system adaptation. The research concludes with recommendations for health ministries and NGOs seeking scalable, cost-effective digital health frameworks in resource-limited settings.

Keywords: wireless communication, rural health, Afghanistan, telemedicine, wearable sensors

DESIGN AND TESTING OF FAULT-TOLERANT MOTOR DRIVES FOR INDUSTRIAL AUTOMATION

Dr. Fatema Habibi
Herat University, Afghanistan

Abstract

This technical study examines the development, simulation, and prototype testing of fault-tolerant motor drive systems intended for industrial automation applications in Afghan manufacturing. Emphasis is placed on redundancy strategies, real-time diagnostics, and hardware-software integration to maintain continuous operation despite component failures. Results from laboratory tests and pilot factory installations illustrate increased uptime, operational safety, and resource optimization. The study indicates that the adoption of robust drive designs can play a key role in modernizing Afghanistan's industrial sector. The paper synthesizes lessons for engineers and policy planners engaging in automation under economic and infrastructural constraints.

Keywords: fault-tolerant drives, Afghanistan, industrial automation, motor control, reliability

AI-POWERED IMAGE RECOGNITION TECHNOLOGIES FOR CIVIL INFRASTRUCTURE MONITORING IN KABUL

Assis. Prof. Dr. Amir Rezai

Kabul Polytechnic University, Afghanistan

Dr. Haroon Hussaini

Kabul Polytechnic University, Afghanistan

Maryam Ali

Bamyan University, Afghanistan

Omid Najafi

Herat University, Afghanistan

Abstract

Focusing on the urban context of Kabul, this research explores the application of artificial intelligence-based image recognition systems for the non-invasive monitoring of civil infrastructure such as bridges, roads, and public buildings. Through case studies and field pilots, the authors evaluate the accuracy, speed, and scalability of deep learning algorithms deployed on drones and fixed cameras to detect structural anomalies, cracks, or aging. The integration of these technologies in city-wide data management platforms is discussed, along with local requirements regarding data privacy and infrastructure maintenance. Findings suggest that AI-powered monitoring can enhance preventive maintenance efforts, reduce costs, and support safer urban environments.

Keywords: image recognition, AI, infrastructure monitoring, Afghanistan, civil engineering

EVALUATING THE IMPACT OF HEALTH EDUCATION PROGRAMS ON DIABETES PREVENTION IN IRANIAN COMMUNITIES

Prof. Dr. Shirin Jafari
Tehran University of Medical Sciences, Iran

Dr. Nima Ebrahimi
Tehran University of Medical Sciences, Iran

Assis. Prof. Dr. Laleh Moradi
Tehran University of Medical Sciences, Iran

Abstract

This study examines the effectiveness of health education initiatives designed to prevent diabetes within diverse Iranian communities. Through a mixed-methods approach combining surveys, focus groups, and pre- and post-program health screenings, the research explores changes in public awareness, lifestyle choices, and clinical markers such as blood glucose and BMI. Results demonstrate significant improvements in dietary habits, physical activity, and diabetes-related knowledge among participants in both urban and rural regions. The paper addresses challenges such as health literacy gaps and socio-economic disparities that affect program reach and efficacy. Cultural tailoring of educational materials and community engagement are shown to enhance participation and retention. The analysis recommends expanding health education programs with ongoing monitoring and policy support, highlighting the significance of early intervention and preventive care in reducing national diabetes burden.

Keywords: diabetes prevention, health education, Iran, community health, chronic disease

**GENETIC SCREENING AND COUNSELING FOR HEREDITARY CANCERS:
PRACTICES AND CHALLENGES IN IRAN**

Assis. Prof. Dr. Roya Behzad
Isfahan University of Medical Sciences, Iran

Dr. Navid Parsa
Isfahan University of Medical Sciences, Iran

Abstract

This research investigates the current landscape of genetic screening and counseling for hereditary cancers in Iran, focusing on breast, ovarian, and colorectal cancers. Using hospital records, provider interviews, and patient surveys, the study evaluates the accessibility, uptake, and impact of genetic services. Barriers identified include limited genetic literacy, shortage of trained counselors, and social stigma surrounding hereditary risk. The findings highlight the potential of genetic interventions to reduce cancer morbidity through early detection, but emphasize the necessity for public education campaigns, integration of services into primary care, and the establishment of ethical guidelines. The conclusion emphasizes collaborative efforts between medical, governmental, and community organizations in advancing effective and equitable cancer prevention strategies nationwide.

Keywords: genetic screening, hereditary cancer, counseling, Iran, public health

STRENGTHENING MATERNAL HEALTHCARE ACCESS IN LOW-RESOURCE NIGERIAN SETTINGS

Prof. Dr. Olufunmilayo Adeyemi
University of Ibadan, Nigeria

Dr. Jamila Musa
University of Ibadan, Nigeria

Assis. Prof. Dr. Chinedu Okeke
University of Ibadan, Nigeria

Ngozi Chukwu
University of Ibadan, Nigeria

Abstract

This comprehensive study explores barriers and facilitators to maternal healthcare access in low-resource Nigerian communities. By conducting community surveys, interviews with healthcare providers, and descriptive statistical analysis, the research identifies key factors affecting antenatal attendance, skilled birth delivery, and postpartum care. The role of cultural practices, infrastructure gaps, financial constraints, and social support networks are assessed. Interventions such as mobile clinics, community health workers, and public awareness programs are evaluated for effectiveness. Notably, outreach and health education were shown to improve service utilization and maternal outcomes. The research advocates for multi-sectoral approaches, policy reforms, and increased investment in rural health infrastructure to achieve sustainable improvement in maternal and child health.

Keywords: maternal health, healthcare access, Nigeria, rural communities, public health intervention

BURDEN OF MALARIA AND COMMUNITY RESPONSES TO VECTOR CONTROL IN RURAL NIGERIA

Dr. Adedayo Ogunleye
Obafemi Awolowo University, Nigeria

Assis. Prof. Dr. Funke Adebayo
Obafemi Awolowo University, Nigeria

Abstract

This research evaluates the ongoing burden of malaria in rural Nigerian communities and analyzes responses to vector control interventions such as insecticide-treated nets (ITNs) and indoor residual spraying. Quantitative data from field surveys and qualitative interviews with residents and health workers reveal the persistence of malaria incidence, despite wide distribution of ITNs. Challenges are linked to net usage compliance, perception of side effects, and seasonal migration patterns. The study identifies the importance of sustained education efforts and adaptive distribution strategies that align with community norms. Recommendations include integrating vector control with local health promotion campaigns and engaging community leaders to improve participation. The conclusion stresses the need for innovative, context-sensitive solutions to achieve lasting reductions in malaria prevalence.

Keywords: malaria, vector control, Nigeria, rural health, disease prevention

REFORMING MEDICAL EDUCATION IN ALBANIA: COMPETENCY-BASED CURRICULA AND TEACHING STRATEGIES

Prof. Dr. Arben Leka
University of Tirana, Albania

Dr. Elda Nuri
University of Tirana, Albania

Blendi Sorra
University of Tirana, Albania

Assis. Prof. Dr. Lira Hysa
University of Tirana, Albania

Abstract

This article analyzes efforts to reform medical education in Albania through competency-based curricula and innovative teaching strategies. The research utilizes curriculum content analysis, faculty workshops, and assessment of student performance indicators to evaluate outcomes. Advances include problem-based learning modules, clinical simulation, and inter-professional education. Barriers remain in resource allocation, instructor training, and alignment with European standards. Student feedback indicates improved confidence and critical thinking skills. The evidence suggests that such reforms are vital for aligning medical training with health system priorities and EU integration processes. Policy recommendations focus on faculty development, resource investment, and continuous curricular review to sustain progress.

Keywords: medical education, Albania, competency-based curriculum, educational reform, teaching innovation

CHALLENGES IN IMPLEMENTING ELECTRONIC HEALTH RECORDS (EHR) SYSTEMS IN ALBANIAN HOSPITALS

Assis. Prof. Dr. Jona Dervishi
University of Medicine, Tirana, Albania

Dr. Renis Tashi
University of Medicine, Tirana, Albania

Abstract

This study assesses the challenges and opportunities associated with electronic health records (EHR) implementation in Albania's hospital sector. Through interviews with IT staff, clinicians, and administrators, findings highlight barriers such as insufficient digital infrastructure, resistance to change, staff training needs, and data privacy issues. Comparative analysis with neighboring countries offers insights into best practices and scalable implementation. Successful pilot programs demonstrate improved data accessibility and patient care coordination but underline the necessity for nationwide training and robust cybersecurity protocols. The research concludes with recommendations for a phased approach to EHR adoption, governmental support, and greater user engagement.

Keywords: electronic health record, Albania, health informatics, hospital management, digital transformation

**PREVALENCE OF CARDIOVASCULAR RISK FACTORS AMONG
UNIVERSITIES' STUDENTS IN MONGOLIA**

Prof. Dr. Bat-Erdene Batbayar
National University of Medical Sciences, Mongolia

Dr. Oyun-Erdene Tungalag
Mongolian University of Science and Technology, Mongolia

Erdenebat Naranbaatar
National University of Medical Sciences, Mongolia

Abstract

This cross-sectional study assesses the prevalence and determinants of cardiovascular risk factors—hypertension, obesity, smoking, and physical inactivity—among university students in Mongolia. Using biometric screenings, questionnaires, and lifestyle assessments from several universities, the study reports growing rates of obesity and hypertension, especially in urban campuses. Gender, socioeconomic background, and dietary patterns emerge as significant determinants. The findings highlight the urgent need for preventive campus health programs, routine screenings, and student-centered interventions. Policy implications include incorporating cardiovascular health education in university curricula and enhancing university health services to address modifiable risk factors.

Keywords: cardiovascular risk, Mongolia, university students, obesity, prevention

SUSTAINABLE OLIVE CULTIVATION PRACTICES AND THEIR IMPACT ON SOIL HEALTH IN TUNISIA

Prof. Dr. Nabil Ben Youssef
University of Carthage, Tunisia
Dr. Hela Amari
University of Sfax, Tunisia

Abstract

This research addresses the sustainability challenges and solutions related to olive cultivation in Tunisia, a country recognized as one of the world leaders in olive oil production. Employing a mixed-methods approach that includes field experiments, soil analyses, and farmer interviews, the study evaluates how various agronomic practices influence soil health over multiple seasons. Among the key practices investigated are organic amendment use, cover cropping, conservative irrigation, and crop rotation. The results demonstrate that adopting soil-friendly methods not only increases olive yield but also improves soil organic matter levels, microbial activity, and water retention. These practices mitigate erosion and reduce dependence on chemical fertilizers, supporting a shift toward more ecological agriculture. Farmer adoption rates are analyzed in the context of economic incentives and governmental support. The findings underscore the importance of policy initiatives that promote knowledge transfer and sustainable techniques, ensuring long-term productivity and resource conservation in Tunisia's crucial olive sector.

Keywords: sustainable agriculture, olive cultivation, soil health, Tunisia, agroecology

WATER MANAGEMENT STRATEGIES FOR IRRIGATED AGRICULTURE IN SEMI-ARID TUNISIAN REGIONS

Dr. Yasmine Belkadhi

University of Tunis El Manar, Tunisia

Abstract

This paper explores innovative water management approaches applied in irrigated farming systems in semi-arid areas of Tunisia. Through case studies of wheat, tomato, and date palm operations, the study assesses the effectiveness of drip irrigation, deficit irrigation, and rainwater harvesting in enhancing water use efficiency. The research employs remote sensing, in-situ sensors, and GIS mapping to evaluate water allocation and crop performance. Findings reveal that integrating modern irrigation technologies with traditional water-saving techniques substantially increases water productivity and crop yields while preventing soil salinization. Barriers to adoption include infrastructure costs, farmer training needs, and fluctuating water policy frameworks. Policy recommendations focus on enhanced support for extension services, investment in water infrastructure, and farmer co-operatives to foster resilient, water-efficient agriculture in Tunisia's most vulnerable regions.

Keywords: water management, irrigation, semi-arid agriculture, Tunisia, resource efficiency

IMPROVING SORGHUM YIELD THROUGH GENETIC DIVERSITY AND AGROECOLOGICAL PRACTICES IN ETHIOPIA

Prof. Dr. Amare Getahun
Addis Ababa University, Ethiopia
Dr. Hana Tsegaye
Jimma University, Ethiopia
Assis. Prof. Dr. Bekele Alemu
Haramaya University, Ethiopia

Abstract

This work investigates how exploiting genetic diversity within sorghum varieties, in tandem with agroecological farming practices, can increase yields and resilience for smallholder farmers in Ethiopia. Field trials across multiple agroecological zones compare indigenous landraces with improved hybrids, focusing on key agronomic, pest resistance, and drought tolerance traits. Participatory evaluations with farming communities enrich the dataset, while laboratory analysis reveals genetic markers linked with superior performance. The research further evaluates crop rotation, intercropping, and organic matter management as yield-boosting and risk-reducing strategies. Results show that a blend of local knowledge, varietal diversity, and ecological practice supports productivity, adaptation to climate extremes, and long-term food security. The findings advocate for research-driven agricultural extension and policy strategies that protect and harness on-farm genetic resources across Ethiopia's diverse cropping systems.

Keywords: sorghum, genetic diversity, agroecology, Ethiopia, smallholder agriculture

INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND BIOPESTICIDES IN ETHIOPIAN HORTICULTURE

Dr. Sosina Abebe

Hawassa University, Ethiopia

Mulu Worku

Mekelle University, Ethiopia

Abstract

This paper analyzes the current trends, successes, and challenges of integrated pest management (IPM) in Ethiopia's rapidly modernizing horticultural sector. Data are drawn from large-scale greenhouse and open-field production of tomatoes, green beans, and flowers. The study tests biopesticide efficacy and insectary-reared natural enemies versus conventional chemical pesticides. Results indicate that, when paired with cultural and physical control methods, biopesticides can significantly reduce pest infestations while lowering environmental and health risks. The research highlights bottlenecks such as cost, knowledge gaps, and regulatory complexity in biopesticide registration and adoption. Recommendations center on fostering public-private partnerships, farmer cooperatives, and targeted training to mainstream IPM. The authors argue that a robust IPM approach, customized for local crops and pests, is vital for sustainable and globally competitive horticulture in Ethiopia.

Keywords: integrated pest management, biopesticides, horticulture, Ethiopia, sustainable agriculture

PRECISION AGRICULTURE APPLICATIONS IN WINTER WHEAT PRODUCTION IN RUSSIA

Dr. Nikolai Petrov

Lomonosov Moscow State University, Russia

Assoc. Prof. Dr. Svetlana Ivanova

Kuban State Agrarian University, Russia

Abstract

This study presents the implementation and impact of precision agriculture technologies, such as GPS-guided machinery, variable rate fertilization, and unmanned aerial vehicles, in winter wheat fields across southern Russia. Extensive field trials and yield monitoring reveal considerable increases in nutrient use efficiency, reduced input costs, and improved yields. Soil sampling, remote sensing, and big data analytics enable site-specific management, which reduces environmental impact and enhances sustainability. Barriers to large-scale adoption are discussed, including initial investment requirements, the need for technical expertise, and farm size. The authors recommend government-backed incentives and university-led demonstration farms to accelerate adoption. Broader implications suggest that precision agriculture is set to reshape Russian grain production toward greater productivity and environmental stewardship, with potential lessons for global cereal systems.

Keywords: precision agriculture, winter wheat, Russia, technology adoption, site-specific farming

RUSSIAN GRASSLAND MANAGEMENT: CONSERVATION, CARBON SEQUESTRATION, AND LIVESTOCK PRODUCTIVITY

Prof. Dr. Olga Smirnova

Saint Petersburg State University, Russia

Dr. Aleksandr Vasiliev

Novosibirsk State University, Russia

Ivan Kovalev

Saint Petersburg State University, Russia

Abstract

Examining Russia's vast grasslands, this research evaluates strategies for balancing conservation, carbon sequestration, and livestock productivity. The study combines ecological field surveys, livestock performance trials, and carbon stock measurements across steppe and meadow biomes. Rotational grazing and native species reintroduction are assessed alongside economic incentives for sustainable management. Results highlight the significant potential of well-managed grasslands in supporting biodiversity, increasing soil carbon, and boosting animal yields, while preventing overgrazing and degradation. The paper addresses policy gaps, stakeholder conflicts, and necessary government interventions to align conservation and economic goals. The conclusions offer a framework for large-scale, sustainable grassland management relevant throughout temperate Eurasia and focus on integrating ecological services in agricultural policy making.

Keywords: grassland management, Russia, conservation, carbon sequestration, livestock productivity

MODERN DESERT FARMING TECHNIQUES IN THE ARABIAN PENINSULA: CHALLENGES AND PROSPECTS

Prof. Dr. Maha Al-Zahrani

King Saud University, Saudi Arabia

Dr. Omar Al-Barakati

United Arab Emirates University, United Arab Emirates

Assis. Prof. Dr. Waleed Al-Yousef

Qatar University, Qatar

Nasser Al-Farsi

Sultan Qaboos University, Oman

Abstract

This paper examines the recent advancements and persistent difficulties in developing sustainable agriculture within the desert landscapes of the Arabian Peninsula. The research outlines the application of hydroponics, drip irrigation, controlled-environment agriculture, and salt-tolerant crops in countering water scarcity and poor soil fertility. Multi-site case studies provide insights into cost-benefit analyses, ecological impacts, and scalability for commercial production. Collaboration between regional universities and governmental agencies is found to play a crucial role in technology transfer and farmer training. However, obstacles remain in ensuring water use efficiency, system maintenance, and access to green technology for smallholder farmers. Policy implications highlight the need for targeted subsidies, integrated resource management, and long-term scientific innovation to secure food production in this arid region.

Keywords: desert farming, Arabian Peninsula, hydroponics, water conservation, sustainable agriculture

RECLAIMING MARGINAL LANDS FOR AGRICULTURE IN ARID REGIONS OF THE ARAB WORLD

Dr. Hanan Al-Salem
Kuwait University, Kuwait
Prof. Dr. Saeed Al-Harbi
King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia

Abstract

This research investigates strategies and practical outcomes of restoring degraded, saline, or sandy lands to productive agriculture across the Arab world's arid zones. Field trials and laboratory analyses evaluate amendments such as gypsum, organic compost, and biochar for soil improvement and the establishment of drought- and salt-tolerant crops. Socioeconomic data illustrate successful farmer participation and increased food security, but also document barriers like access to materials and technical know-how. Environmental benefits, including erosion control and carbon capture, are detailed. The study argues that interdisciplinary initiatives backed by robust policy support can scale up land reclamation to meet future food demand, with regional partnerships vital for spreading practical knowledge and research advances.

Keywords: land reclamation, arid regions, saline soils, Arab world, sustainable agriculture

DEVELOPMENT AND PHARMACOKINETIC EVALUATION OF HERBAL ANTIOXIDANT FORMULATIONS FOR CHRONIC DISEASE MANAGEMENT

Prof. Dr. Lamia Bensalem
University of Algiers, Algeria

Dr. Karim Djeghlal
University of Algiers, Algeria

Abstract

This research investigates the formulation and pharmacokinetic characterization of herbal antioxidant products intended for chronic disease management, with a focus on bioavailability improvements and safety profiling. Using extracts from indigenous Algerian medicinal plants, both standardized and novel semi-synthetic preparations were developed and assessed through in vitro assays and in vivo animal studies. Key outcome measures included absorption rate, tissue distribution, metabolic stability, and potential hepatic or renal toxicity. Results demonstrated that optimized formulations significantly improved antioxidant activity, slowing the progression of oxidative stress markers in chronic pathologies. The study revealed variability in pharmacokinetic profiles based on both the extraction method and excipient composition. Clinical translation was evaluated through initial human safety trials, which indicated good tolerability and the potential for integration into multi-modal chronic disease therapy. The findings underscore the relevance of local botanical resources in pharmaceutical innovation and highlight the need for further large-scale clinical assessments to validate long-term efficacy and safety in diverse patient populations.

Keywords: herbal medicine, pharmacokinetics, antioxidants, chronic disease, Algeria

CURRENT CHALLENGES IN ANTIMICROBIAL STEWARDSHIP PROGRAMS IN ALGERIAN HOSPITAL PHARMACY PRACTICE

Assis. Prof. Dr. Nesrine Toumi
University of Oran 1 Ahmed Ben Bella, Algeria

Dr. Ilyes Bendaoud
University of Oran 1 Ahmed Ben Bella, Algeria

Abstract

This comprehensive review analyzes the effectiveness and implementation problems of antimicrobial stewardship programs (ASP) across hospital pharmacies in Algeria. Data was collected through structured interviews with pharmacy staff, audits of prescription protocols, and evaluation of resistance trend reports from various teaching hospitals. Findings revealed multiple barriers, including insufficient staff training, lack of protocol standardization, communication gaps between pharmacists and prescribers, and limited integration of clinical decision-support systems. The study also explores the consequences of high empirical antibiotic use and the challenges presented by multi-drug resistant organisms. Key recommendations involve strengthening interprofessional education, upgrading information technologies in pharmacies, and establishing national guidelines tailored for the Algerian clinical context. This work highlights the essential role of hospital pharmacists in ASP leadership to reduce inappropriate antibiotic usage and curb resistance rates while safeguarding patient safety.

Keywords: antimicrobial stewardship, hospital pharmacy, antibiotics, resistance, Algeria

NICOTINE ADDICTION AND PHARMACOLOGICAL INTERVENTIONS AMONG SYRIAN YOUTH: A CROSS-SECTIONAL STUDY

Prof. Dr. Nour Al-Shami
Damascus University, Syria

Dr. Bassel Haddad
Damascus University, Syria

Dr. Lina Mansour
Aleppo University, Syria

Abstract

This cross-sectional study examines the prevalence of nicotine addiction among Syrian adolescents and the evaluation of available pharmacological interventions in supporting smoking cessation. The researchers conducted structured interviews with over 600 students from urban and rural schools and analyzed cessation rates through follow-up at community health centers. Pharmacotherapies investigated included nicotine replacement therapy, bupropion, and varenicline. Results indicated that while pharmacological interventions improved cessation attempts slightly over behavioral counseling alone, accessibility and social stigma limited comprehensive adoption. The report underscores gaps in public awareness, cultural resistance, and availability of medications in war-affected regions. The authors propose the establishment of integrated school- and pharmacy-based intervention programs and community campaigns to promote early intervention and standardize cessation protocols across Syria.

Keywords: nicotine addiction, pharmacological interventions, adolescents, cessation, Syria

EVALUATION OF TRADITIONAL HERBAL DRUG USE IN PHARMACEUTICAL PRACTICE IN SYRIA

Assis. Prof. Dr. Hani Nasr
Tishreen University, Syria

Amina Qabbani
Tishreen University, Syria

Abstract

This research investigates the widespread use and pharmaceutical integration of traditional herbal remedies in Syria's current health landscape. By combining patient surveys at major community pharmacies with interviews of practicing pharmacists, the study documents the types of herbal medicines dispensed, usage trends, and drug-herb interaction awareness. Findings revealed notable reliance on remedies for digestive and respiratory complaints, but a lack of comprehensive regulatory oversight and variability in product quality. Interviews highlighted both opportunities — such as patient trust and cultural acceptance — and risks, including inconsistent counseling and limited scientific validation of efficacy and safety. Recommendations call for regulatory updates, creation of a national herbal pharmacopeia, and pharmacist education programs in phytotherapy and risk communication.

Keywords: herbal medicine, pharmaceutical practice, traditional remedies, Syria

CLINICAL OUTCOMES OF MULTI-DRUG THERAPY FOR TUBERCULOSIS PATIENTS IN SENEGAL: A PHARMACY-BASED COHORT STUDY

Dr. Aissatou Faye
Cheikh Anta Diop University, Senegal

Moussa Ndiaye
Cheikh Anta Diop University, Senegal

Prof. Dr. Alioune Diop
University of Thies, Senegal

Abstract

This cohort study investigates the effectiveness of multi-drug therapy for tuberculosis (TB) patients managed through pharmacy-led initiatives in urban and rural sites across Senegal. The research collected longitudinal data on drug adherence, adverse event reporting, and treatment outcomes. Results indicated high levels of treatment completion where pharmacists implemented adherence counseling, outreach education, and medication management systems. However, barriers included intermittent drug supply, transportation limitations, and patient socioeconomic status. Statistical analysis revealed that enhanced pharmacy involvement significantly reduced default rates and improved cure rates compared to standard care. The study underscores the importance of integrating pharmacists in TB management and advocates for expanded pharmacist-led education and adherence programs as part of national TB policy in low-resource settings.

Keywords: tuberculosis, multi-drug therapy, pharmacy practice, treatment outcomes, Senegal

PHARMACOVIGILANCE AND ADVERSE DRUG REACTION REPORTING SYSTEMS IN SENEGALESE HOSPITALS

Prof. Dr. Marième Diouf
University of Bamako, Senegal

Assis. Prof. Dr. Serigne Gueye
Cheikh Anta Diop University, Senegal

Fatoumata Sarr
Cheikh Anta Diop University, Senegal

Dr. Abdoulaye Diallo
University of Saint-Louis, Senegal

Abstract

This study analyzes the effectiveness and limitations of pharmacovigilance systems and adverse drug reaction (ADR) reporting in major Senegalese hospitals. Through surveys with pharmacists, reviews of ADR records, and focus groups with hospital administrators, the research highlights under-reporting, limited awareness, and lack of digital infrastructure as key barriers to effective pharmacovigilance. The implementation of electronic reporting tools and educational interventions improved ADR notification and monitoring rates, but resource gaps and staff shortages hindered sustainability and nationwide rollout. The authors recommend further investment in training, inter-hospital data sharing, and adaptive policies for context-specific challenges. These approaches are essential to optimizing patient safety and medication efficacy in Senegal's evolving healthcare system.

Keywords: pharmacovigilance, adverse drug reactions, reporting systems, hospital pharmacy, Senegal

EVALUATION OF PHARMACOGENOMIC TESTING PRACTICES IN AZERBAIJANI COMMUNITY PHARMACIES

Prof. Dr. Leyla Abbasova
Azerbaijan Medical University, Azerbaijan

Dr. Kamran Akhundov
Azerbaijan Medical University, Azerbaijan

Dr. Arzu Guliyeva
Khazar University, Azerbaijan

Abstract

This paper explores the current status and effectiveness of pharmacogenomic testing services in community pharmacies across Azerbaijan. Semi-structured interviews and survey data from pharmacists and patients were used to assess the extent of pharmacogenomic testing integration, patient counseling quality, and clinical utility. While the availability of pharmacogenomic services increased, constraints including variable training, limited test reimbursement, and inconsistent physician-pharmacist collaboration were identified. Case studies show that tailored drug therapy based on genetic profiling led to improved outcomes in cardiovascular and psychiatric medication regimens. However, robust policy guidelines and interdisciplinary training are needed to support safe, standardized implementation at scale.

Keywords: pharmacogenomics, community pharmacy, personalized medicine, Azerbaijan

PARASITIC INFESTATIONS IN SMALL RUMINANTS: CHALLENGES FOR RURAL LIVESTOCK FARMERS IN TAJIKISTAN

Shodmon Mirzoev
Tajik National University, Tajikistan

Dr. Farzona Rajabova
Tajik National University, Tajikistan

Jamila Saidova
Tajik National University, Tajikistan

Abstract

A major obstacle to sustainable small ruminant farming in Tajikistan is the prevalence of parasitic infestations, particularly gastrointestinal nematodes and ectoparasites. This paper reports findings from a cross-sectional survey of over 800 sheep and goats in three provinces, utilizing fecal examination, blood sampling, and external parasite identification. The most frequent infestations included *Haemonchus contortus* and tick species responsible for significant morbidity and production loss. Interviews with farmers revealed gaps in parasite management, limited knowledge of anthelmintic resistance, and cultural adherence to traditional treatment methods. Statistical analysis showed clear associations between poor husbandry, irregular deworming, and high infection rates. The study examined educational outreach by extension services and efficacy of locally available antiparasitic drugs. Improved farmer training, rotation grazing, and integrated parasite control are advocated. Emphasis is placed on building partnerships between universities and local agencies, ensuring cost-effective strategies and sustainable improvements in animal health and productivity.

Keywords: small ruminants, parasites, Tajikistan, animal husbandry, extension education

CONTROL OF BRUCELLOSIS IN DAIRY CATTLE: VACCINATION EFFORTS IN EGYPTIAN GOVERNORATES

Prof. Dr. Hossam Eldin Mahmoud
Cairo University, Egypt

Ahmed Zaki
Cairo University, Egypt

Assis. Prof. Dr. Mona El-Sayed
Cairo University, Egypt

Abstract

This paper examines the status and effectiveness of brucellosis vaccination campaigns across multiple Egyptian governorates, focusing on *Brucella abortus* and *Brucella melitensis*. Field surveys combined laboratory assessments of serological responses in over 4,000 dairy cattle and goats. Despite a concerted vaccination effort, outbreak hotspots persisted, traced to logistical lapses, cold-chain failures, and vaccine hesitancy among farmers due to misinformation. Regression analysis of risk factors found significant associations with herd size, open grazing, and lack of follow-up post-vaccination. Stakeholder interviews revealed that continuous educational programs and veterinary follow-up visits were critical in increasing compliance. Policy recommendations include digital tracking of vaccination status, mandatory reporting, and targeted retraining for rural veterinarians. This study contributes actionable insights for controlling zoonotic diseases and improving livestock productivity, with broad implications for food safety and rural livelihoods in Egypt.

Keywords: brucellosis, vaccination, Egypt, dairy cattle, disease management

AVIAN INFLUENZA MONITORING AND BIOSECURITY PRACTICES IN POULTRY FARMS OF EGYPT

Dr. Faten Abdelrahim
Alexandria University, Egypt

Mohamed Saber
Alexandria University, Egypt

Abstract

Avian influenza poses ongoing threats to poultry production and food security in Egypt. This research monitored virus prevalence and evaluated biosecurity measures at commercial and backyard farms in three regions. Over 3,500 samples from birds, workers, and environments were analyzed using PCR and serological assays, revealing sporadic outbreaks and evidence of H5 and H9 strains co-circulating in the region. The study identified critical lapses in quarantine practices, movement control, and disinfection routines, especially in informal farming sectors. Surveys of farm managers highlighted resource constraints, insufficient training, and gaps in government support. Comparison of biosecurity scores confirmed that higher standards correlate strongly with lower outbreak risk and economic loss. The paper emphasizes the need for centralized surveillance, targeted extension services, and regional cooperation on disease reporting. Recommendations include capacity-building, subsidized biosecurity upgrades, and public awareness campaigns to reduce risk and enhance Egypt's poultry sector resilience.

Keywords: avian influenza, Egypt, poultry, biosecurity, surveillance

TICK-BORNE DISEASES IN IRANIAN SHEEP FLOCKS: MOLECULAR DIAGNOSIS AND CONTROL MEASURES

Prof. Dr. Hassan Shirazi

Tehran University, Iran

Assis. Prof. Dr. Sara Foroughi

Tehran University, Iran

Dr. Mohsen Farzi

Tehran University, Iran

Abstract

Tick-borne diseases (TBDs) present significant challenges for sheep production in Iran's arid and semi-arid regions. This study combined field sampling with advanced PCR-based diagnostics to detect pathogens such as *Anaplasma*, *Babesia*, and *Theileria* among 18 flocks in two provinces. Results demonstrated a high prevalence of mixed infections, with spatial analysis linking outbreaks to environmental and management factors. Questionnaires administered to flock owners revealed gaps in tick control practices and misunderstanding of acaricide use and resistance. The cost-effectiveness of different control strategies, including strategic dipping, pasture management, and genetic selection for resistance, was assessed. The findings stress the need for veterinary extension, integrated disease surveillance, and regionally tailored intervention policies. Enhancing collaboration between researchers, veterinary practitioners, and farmers is essential for reducing productivity losses and improving animal welfare in resource-constrained settings.

Keywords: tick-borne diseases, Iran, sheep, molecular diagnosis, animal health policy

VETERINARY EDUCATION REFORM AND PRACTICAL TRAINING IN IRANIAN UNIVERSITIES

Dr. Sahar Kaviani
Shiraz University, Iran

Prof. Dr. Ali Akbar Dehghan Banadaki
Shiraz University, Iran

Abstract

This paper critically evaluates the structure and reforms of veterinary education in Iran, focusing on bridging the gap between theoretical knowledge and practical field training. The study analyzed curriculum frameworks at six major universities, stakeholder workshops, and graduate employment outcomes. Challenges identified include insufficient clinical exposure, outdated teaching resources, and limited industry collaboration. The reformative measures reviewed include curricular integration of new diagnostic technologies, expanded internships, and partnerships with private clinics. Evaluation of pre- and post-reform cohorts indicated significant improvements in clinical competency and problem-solving abilities. Faculty interviews and employer surveys provided feedback on curriculum relevance and industry expectations. The findings demonstrate that innovation in curriculum design and hands-on training are crucial for producing veterinarians ready for modern challenges, and call for sustained investment in faculty development and infrastructure.

Keywords: veterinary education, Iran, curriculum reform, practical training, employability

SURVEILLANCE OF ZONOTIC DISEASES AT THE WILDLIFE-LIVESTOCK INTERFACE IN WESTERN INDIA

Dr. Ramesh Gopalakrishnan
Gujarat Veterinary College, India

Assis. Prof. Dr. Meera Nair
Gujarat Veterinary College, India

Abstract

India's Western region is a hotspot for zoonotic disease emergence due to close wildlife-livestock interactions. This study details three years of surveillance across national parks and bordering livestock farms, focusing on pathogens including foot-and-mouth disease, leptospirosis, and anthrax. Using serological surveillance, GPS tracking, and molecular diagnostics, the research mapped transmission routes and identified risk factors such as habitat fragmentation and unregulated livestock movement. Collaboration with forest rangers and local governments enabled rapid response to outbreaks. The findings highlight effective strategies, such as buffer zone vaccination, stakeholder education, and cross-sectoral reporting systems to mitigate transmission risks. Insights inform the development of early warning and contingency plans, advancing the One Health approach.

Keywords: zoonoses, India, wildlife-livestock, surveillance, One Health

EVALUATION OF TRYPANOSOMIASIS CONTROL PROGRAMS IN INDIAN DAIRY CATTLE

Prof. Dr. Priya Sreenivasan

Tamil Nadu Veterinary and Animal Sciences University, India

Dr. Bhaskar Rao

Tamil Nadu Veterinary and Animal Sciences University, India

Dr. Aparna Nair

Tamil Nadu Veterinary and Animal Sciences University, India

Abstract

Trypanosomiasis, a vector-borne disease, threatens dairy productivity in southern India. This study assesses national and state control campaigns, including chemotherapeutic protocols, vector management, and farmer outreach. Data from 40 dairy cooperatives revealed sporadic outbreaks linked to altered rainfall patterns and surveillance lapses. Interviews with farmers and veterinarians showed awareness gaps and drug resistance as persistent problems. The cost-effectiveness and impact of control measures were examined through milk yield, morbidity, and economic loss metrics. The research advocates for integrated vector management, periodic training, and strengthening public–private partnerships. The paper concludes with an agenda for tailored region-specific interventions and highlights ongoing research on vaccine candidates.

Keywords: trypanosomiasis, India, dairy cattle, disease control, vector management

PHOTOCATALYTIC WATER SPLITTING USING NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE

Assis. Prof. Dr. Afsaneh Ramezani
Sharif University of Technology, Iran
Ali Jamshidi
Sharif University of Technology, Iran

Abstract

This paper presents the synthesis, characterization, and water splitting performance of nanostructured titanium dioxide (TiO₂) photocatalysts. Advanced hydrothermal and sol-gel techniques were employed to control particle size, morphology, and phase composition. XRD, TEM, UV-Vis, and BET analyses confirmed the production of anatase-rich TiO₂ with superior surface area and light absorption properties. Lab-scale photoreactors tested the hydrogen evolution under simulated solar irradiation, comparing the effects of doping with transition metals and non-metals on photocatalytic efficiency. Results revealed enhanced hydrogen yields with doped TiO₂, attributed to reduced recombination rates and increased charge carrier mobility. The research discusses practical challenges including scalability, photo-corrosion, and long-term stability, proposing directions for further optimization. This work offers insights for developing efficient, low-cost solar hydrogen generation technologies, supporting Iran's efforts in renewable energy research.

Keywords: photocatalysis, water splitting, titanium dioxide, nanomaterials, hydrogen production

A GREEN SYNTHESIS APPROACH TO BIODEGRADABLE POLYMERS FROM RENEWABLE FEEDSTOCKS

Dr. Priyanka Singh
Indian Institute of Science, India
Manoj Raval
Indian Institute of Science, India

Abstract

Addressing the challenge of plastic waste, this study introduces a green synthesis route for producing biodegradable polymers from renewable plant-based feedstocks. A variety of biomass derivatives—including starch, cellulose, and vegetable oils—were polymerized using environmentally benign catalysts and mild reaction conditions. NMR, GPC, and DSC analyses confirmed the synthesis of polyesters and polyhydroxyalkanoates with tunable thermal and mechanical properties. The study delves deeply into the polymerization kinetics, molecular weight distributions, and processing conditions for each type of monomer. Biodegradability tests under simulated soil and aquatic environments demonstrated rapid material disintegration and low ecological toxicity. The work further examines the lifecycle assessment, highlighting reduced carbon footprint compared to petroleum-based plastics. The research ultimately advocates for policy interventions and industry partnerships to accelerate the market adoption of bio-based, ecofriendly polymers—positioning India as a leader in sustainable plastics innovation.

Keywords: green synthesis, biodegradable polymers, renewable feedstocks, sustainable chemistry, bioplastics

ORGANIC-INORGANIC HYBRID PEROVSKITES FOR NEXT-GENERATION SOLAR CELLS: DESIGN AND STABILITY ANALYSIS

Dr. Sonal Mehra
Indian Institute of Technology Bombay, India
Ajay Bhargava
Indian Institute of Technology Bombay, India

Abstract

This research investigates the design, synthesis, and stability of organic-inorganic hybrid perovskite materials for high-efficiency solar cells. State-of-the-art fabrication techniques, such as solution processing and vapor-assisted deposition, were used for preparing perovskite thin films with varied cation and halide compositions. Advanced characterization tools (SEM, XPS, absorption spectroscopy) provided a deep understanding of structure-property relationships. Device testing under standard conditions revealed efficiencies exceeding 22%, but long-term testing highlighted challenges in device stability due to moisture and thermal effects. The study discusses material engineering solutions, including encapsulation, compositional tuning, and defect passivation, to address degradation pathways. Implications for scalable production and commercial viability are evaluated. The findings position hybrid perovskites as promising, but not yet fully optimized, candidates in solar energy technologies for India's renewable energy transition.

Keywords: perovskites, solar cells, hybrid materials, stability, renewable energy

SYNTHESIS OF FUNCTIONALIZED GRAPHENE OXIDE FOR ORGANIC DYE REMOVAL FROM WATER

Dr. Kavita Agarwal
Jawaharlal Nehru University, India

Abstract

Focusing on environmental remediation, this study details the synthesis of chemically functionalized graphene oxide (GO) for removing organic dyes from polluted water. The GO surface was modified with amino and carboxyl groups to boost adsorption capabilities. Batch adsorption experiments evaluated removal efficiencies for dyes such as methylene blue and rhodamine B under various pH and temperature conditions. Kinetic, isotherm, and thermodynamic analyses informed adsorption mechanisms and capacity. Reusability tests demonstrated functionalized GO's stability and regenerability. The work proposes the integration of GO adsorbents in water treatment plants and discusses the translation of laboratory findings to scalable applications. The research confirms GO's effectiveness as a sustainable, high-surface-area adsorbent, especially for rapid and cost-efficient dye removal in India's textile and chemical industries.

Keywords: graphene oxide, water treatment, adsorption, organic dyes, environmental remediation

BIOCATALYTIC SYNTHESIS OF PHARMACEUTICAL INTERMEDIATES USING ENZYME IMMOBILIZATION STRATEGIES

Prof. Dr. Nour-eddine Bouziane
University of Algiers, Algeria
Assis. Prof. Dr. Lamia Cherif
University of Algiers, Algeria
Dr. Rachid Benyounes
University of Algiers, Algeria

Abstract

This research evaluates biocatalytic synthesis routes for pharmaceutical intermediates using innovative enzyme immobilization techniques. Different supports—such as silica, polymers, and magnetic nanoparticles—were tested for covalent binding and encapsulation of lipase and protease enzymes. Detailed kinetic studies assessed the conversion efficiency of key pharmaceutical precursors, comparing immobilized and free enzyme preparations. Recyclability, operational stability, and product purity were thoroughly analyzed. The study found that immobilized enzymes offer superior activity retention and industrial practicality. Data supports the scalability of these methods for Algeria's pharmaceutical sector, promoting greener, more efficient drug production with minimal waste. The research outlines future perspectives for expanding enzyme libraries and optimizing immobilization chemistry to further enhance process yields.

Keywords: biocatalysis, enzyme immobilization, pharmaceutical synthesis, green chemistry, industrial applications

CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM ALLOYS IN AGGRESSIVE INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

Prof. Dr. Hakim Khellaf

University of Oran, Algeria

Dr. Noor Ahmed

University of Oran, Algeria

Abstract

This paper investigates the corrosion resistance of new-generation aluminum alloys engineered for use in severe industrial environments, such as refineries and marine infrastructure. Alloys with carefully controlled microstructure and alloying elements (Mg, Zn, Cu) were subjected to accelerated corrosion testing, electrochemical analysis, and surface characterization by SEM/EDS. Results indicate substantial improvements in pitting resistance and uniform corrosion rates, attributed to grain boundary engineering and surface passivation. The mechanisms of passive layer formation and breakdown were elucidated, providing insights for alloy optimization and protective coating development. Recommendations extend to industrial deployment, maintenance practices, and lifecycle monitoring—essential for enhancing infrastructure durability in Algeria’s key economic sectors.

Keywords: aluminum alloys, corrosion resistance, industrial environments, materials engineering, surface analysis

Contents

ABIOTIC STRESSES IN PLANTS AND ASTAXANTHIN	1
BİTKİLERDE ABİYOTİK STRESLER VE ASTAKSANTİN	2
IRON BIOFORTIFICATION IN CEREALS: FROM PLANT GENETICS TO PRECISION BREEDING STRATEGIES	11
BAZI ÇİLEK ÇEŞİTLERİNİN KALİTE ÖZELLİKLERİ VE FARKLI KURUTMA YÖNTEMLERİNİN KURU MADDE İÇERİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ	29
PEYNİR ÜRETen İŞLETMELERDE PEYNİR ALTI SUYUNUN DEĞERLENDİRİLMESİNE İLİŞKİN YAKLAŞIMLARIN EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ: BİR LİTERATÜR İNCELEMESİ	41
HEMŞİRELİK BAKIMINDA DİJİTAL İKİZ (DIGİTAL TWIN) TEKNOLOJİSİ: BAKIM HATALARINI ÖNLEME VE GELECEK PROJEKSİYONU	56
ALGORİTMİK ÖNYARGI VE ETİK: HEMŞİRELİKTE YAPAY ZEKANIN GÖRÜNMEYEN RİSKLERİ VE HASTA GÜVENLİĞİ	65
CONTROL OF BRUCELLOSIS IN DAIRY CATTLE: VACCINATION EFFORTS IN EGYPTIAN GOVERNORATES .	75
AVIAN INFLUENZA MONITORING AND BIOSECURITY PRACTICES IN POULTRY FARMS OF EGYPT.....	76
TICK-BORNE DISEASES IN IRANIAN SHEEP FLOCKS: MOLECULAR DIAGNOSIS AND CONTROL MEASURES	77
VETERINARY EDUCATION REFORM AND PRACTICAL TRAINING IN IRANIAN UNIVERSITIES.....	78
SURVEILLANCE OF ZOONOTIC DISEASES AT THE WILDLIFE-LIVESTOCK INTERFACE IN WESTERN INDIA	79
EVALUATION OF TRYPANOSOMIASIS CONTROL PROGRAMS IN INDIAN DAIRY CATTLE.....	80
PHOTOCATALYTIC WATER SPLITTING USING NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE	81
A GREEN SYNTHESIS APPROACH TO BIODEGRADABLE POLYMERS FROM RENEWABLE FEEDSTOCKS....	82
ORGANIC-INORGANIC HYBRID PEROVSKITES FOR NEXT-GENERATION SOLAR CELLS: DESIGN AND STABILITY ANALYSIS	83
SYNTHESIS OF FUNCTIONALIZED GRAPHENE OXIDE FOR ORGANIC DYE REMOVAL FROM WATER.....	84
BIOCATALYTIC SYNTHESIS OF PHARMACEUTICAL INTERMEDIATES USING ENZYME IMMOBILIZATION STRATEGIES	85
CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM ALLOYS IN AGGRESSIVE INDUSTRIAL ENVIRONMENTS.....	86
TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MATERYAL (PCM) KULLANIMI	87
TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE ISI POMPASI KULLANIMI	97
AKILLI ENJEKSİYON KALIPLAMA SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ: MOBİL ENTEGRASYONLU İNSAN-MAKİNE ARAYÜZÜ (HMI) VE HASSAS KOVAN SICAKLIK KONTROLÜ	109
A VEHICLE DYNAMICS–BASED CONCEPTUALIZATION OF ACTIVE SAFETY SYSTEMS AS REAL-TIME BOUNDARY MANAGEMENT MECHANISMS	122
EVOLUTION FROM ACTIVE SAFETY SYSTEMS TO ADAS: A VEHICLE DYNAMICS AND SENSOR FUSION– BASED SYSTEM-LEVEL REVIEW	133
FREN BALATALARINDA ARAMİD ve CAM ELYAFLI TEKSTİL KATMANLARININ SÜRTÜNME STABİLİTESİ ve AŞINMA PERFORMANSINA ETKİSİ	144

PET BAZLI OTOMOTİV KOLTUK KUMAŞINDA UYGULANAN HALOJENLİ ve HALOJENSİZ ALEV GECİKTİRİCİ BİTİM İŞLEMLERİNİN YANICILIK ve DUMAN PERFORMANSINA ETKİLERİ.....	153
MODIFIED-ATMOSPHERE (NITROGEN-FLUSHED) PACKAGING AND QUALITY EVOLUTION OF EXTRUDED SNACKS DURING STORAGE	160
JELKOT KAPLI CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİTMALZEMENİN YÜZEY DAYANIMLARININ İNCELENMESİ	162
MOBİLYA SEKTÖRÜNDE KAPASİTE PLANLAMA VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ANALİZİ: ANKARA ÖRNEĞİ	172
ATIK TETRAPAK AMBALAJLAR VE DOĞAL AHŞAP KAPLAMALARIN KOMBİNASYONU İLE TUTKALSIZ KOMPOZİT PANEL GELİŞTİRİLMESİ	182
GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE GERÇEK VE SİMÜLASYON TABANLI TESİSLERDE PERFORMANS ANALİZİ	193
SYNTHESIS OF MOFS@COTTON MATERIALS AS PHOTOCATALYST	209
NANO PEKTİNİN YAPISAL, KOLLOİDAL VE FOTO-DUYARLI MIS ARAYÜZEY DAVRANIŞININ ÇOK YÖNLÜ KARAKTERİZASYONU	215
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM VE SATHİ KAPLAMANIN FAYDA–MALİYET ANALİZLERİYLE ÖRNEK BİR YOL KEŞİMİ ÜZERİNDEN KARŞILAŞTIRILMASI	216
1975 ÖNCESİ İNŞA EDİLEN BETONARME BİR YAPININ FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ.....	217
06 ŞUBAT 2023 DEPREMLERİNİN ARDINDAN MALATYA'DAKİ BETONARME YAPILARIN YAPISAL DÜZENSİZLİKLER AÇISINDAN İNCELENMESİ	226
FARKLI İŞLEMLER GÖRDÜKTEN SONRA YÜZEYLERİNE TEK VE ÇİFT KOMPONENTLİ PARKE VERNİKLERİ UYGULANMIŞ ADI DIŞBUDAK ODUNUNDA EV İÇİ KİMYASALINA MARUZ KALMANIN RENK PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİLERİ	237
PAMUK KUMAŞLARIN ZERDEÇAL TOZU VE ŞAP MADDESİYLE BOYANMASI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA.....	248
ADAPTIVE REUSE OF HISTORICAL BUILDINGS IN BAKU: CONTEMPORARY CHALLENGES AND INNOVATIVE SOLUTIONS	255
INTEGRATING TRADITIONAL AZERBAIJANI DESIGN PRINCIPLES INTO CONTEMPORARY URBAN HOUSING	256
SUSTAINABLE FLOOD-RESISTANT ARCHITECTURE FOR BANGLADESH'S GROWING DELTA REGIONS ...	257
URBAN DENSIFICATION AND GREEN SPACE PRESERVATION IN DHAKA: DESIGN STRATEGIES AND POLICY APPROACHES	258
INTEGRATING MODULAR CONSTRUCTION WITH MALAYSIAN VERNACULAR ARCHITECTURE: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES	259
TROPICAL ENVIRONMENTAL RESPONSIVENESS IN MALAYSIAN UNIVERSITY CAMPUS DESIGN	260
REHABILITATION OF OTTOMAN-ERA BUILDINGS IN SKOPJE: HISTORICAL ANALYSIS AND CONTEMPORARY CONSERVATION	261
URBAN TRANSFORMATION AND SOCIAL INCLUSION IN POST-SOCIALIST SKOPJE: PUBLIC SPACE REDESIGN.....	262
RENEWABLE ENERGY INTEGRATION IN SMART GRIDS: CHALLENGES AND SOLUTIONS IN PAKISTAN ..	263
DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR FAULT DETECTION IN HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION LINES	264

PHOTOVOLTAIC SYSTEM PERFORMANCE OPTIMIZATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN EGYPTIAN DESERTS	265
DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SMART ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE IN CAIRO	266
ANALYSIS OF MICROGRID STABILITY UNDER VARIABLE LOAD AND GENERATION CONDITIONS IN KABUL	267
EFFICIENT POWER CONVERTER DESIGN FOR RURAL ELECTRIFICATION IN AFGHANISTAN	268
WIRELESS COMMUNICATION FRAMEWORKS FOR REMOTE HEALTH MONITORING IN RURAL AFGHANISTAN	269
DESIGN AND TESTING OF FAULT-TOLERANT MOTOR DRIVES FOR INDUSTRIAL AUTOMATION	270
AI-POWERED IMAGE RECOGNITION TECHNOLOGIES FOR CIVIL INFRASTRUCTURE MONITORING IN KABUL	271
EVALUATING THE IMPACT OF HEALTH EDUCATION PROGRAMS ON DIABETES PREVENTION IN IRANIAN COMMUNITIES	272
GENETIC SCREENING AND COUNSELING FOR HEREDITARY CANCERS: PRACTICES AND CHALLENGES IN IRAN	273
STRENGTHENING MATERNAL HEALTHCARE ACCESS IN LOW-RESOURCE NIGERIAN SETTINGS	274
BURDEN OF MALARIA AND COMMUNITY RESPONSES TO VECTOR CONTROL IN RURAL NIGERIA	275
REFORMING MEDICAL EDUCATION IN ALBANIA: COMPETENCY-BASED CURRICULA AND TEACHING STRATEGIES	276
CHALLENGES IN IMPLEMENTING ELECTRONIC HEALTH RECORDS (EHR) SYSTEMS IN ALBANIAN HOSPITALS	277
PREVALENCE OF CARDIOVASCULAR RISK FACTORS AMONG UNIVERSITIES' STUDENTS IN MONGOLIA	278
SUSTAINABLE OLIVE CULTIVATION PRACTICES AND THEIR IMPACT ON SOIL HEALTH IN TUNISIA	279
WATER MANAGEMENT STRATEGIES FOR IRRIGATED AGRICULTURE IN SEMI-ARID TUNISIAN REGIONS	280
IMPROVING SORGHUM YIELD THROUGH GENETIC DIVERSITY AND AGROECOLOGICAL PRACTICES IN ETHIOPIA	281
INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND BIOPESTICIDES IN ETHIOPIAN HORTICULTURE	282
PRECISION AGRICULTURE APPLICATIONS IN WINTER WHEAT PRODUCTION IN RUSSIA	283
RUSSIAN GRASSLAND MANAGEMENT: CONSERVATION, CARBON SEQUESTRATION, AND LIVESTOCK PRODUCTIVITY	284
MODERN DESERT FARMING TECHNIQUES IN THE ARABIAN PENINSULA: CHALLENGES AND PROSPECTS	285
RECLAIMING MARGINAL LANDS FOR AGRICULTURE IN ARID REGIONS OF THE ARAB WORLD	286
DEVELOPMENT AND PHARMACOKINETIC EVALUATION OF HERBAL ANTIOXIDANT FORMULATIONS FOR CHRONIC DISEASE MANAGEMENT	287

CURRENT CHALLENGES IN ANTIMICROBIAL STEWARDSHIP PROGRAMS IN ALGERIAN HOSPITAL PHARMACY PRACTICE	288
NICOTINE ADDICTION AND PHARMACOLOGICAL INTERVENTIONS AMONG SYRIAN YOUTH: A CROSS- SECTIONAL STUDY.....	289
EVALUATION OF TRADITIONAL HERBAL DRUG USE IN PHARMACEUTICAL PRACTICE IN SYRIA.....	290
CLINICAL OUTCOMES OF MULTI-DRUG THERAPY FOR TUBERCULOSIS PATIENTS IN SENEGAL: A PHARMACY-BASED COHORT STUDY	291
PHARMACOVIGILANCE AND ADVERSE DRUG REACTION REPORTING SYSTEMS IN SENEGALESE HOSPITALS.....	292
EVALUATION OF PHARMACOGENOMIC TESTING PRACTICES IN AZERBAIJANI COMMUNITY PHARMACIES.....	293
PARASITIC INFESTATIONS IN SMALL RUMINANTS: CHALLENGES FOR RURAL LIVESTOCK FARMERS IN TAJIKISTAN.....	294

ABIOTIC STRESSES IN PLANTS AND ASTAXANTHIN

Prof. Dr., MELEK EKINCI

Atatürk University,
ekincim@tauni.edu.tr - 0000-0002-7604-3803

Assoc. Prof. Dr., ESMA YIGIDER

Atatürk University,
esma.yigider@atauni.edu.tr- 0000-0002-6896-0193

Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM

Atatürk University,
ertanyil@tauni.edu.tr - 0000-0003-3369-0645

Prof. Dr., MURAT AYDIN

Atatürk University,
maydin@tauni.edu.tr - 0000-0003-1091-0609

ABSTRACT

Changing climate and soil conditions worldwide are particularly affecting agricultural production. These adverse factors reduce plant growth and development, and consequently, yield and quality. This decline leads to significant economic losses. In agriculture, abiotic stresses (salinity, drought, temperature, UV and heavy metal) cause important damage to plants. Therefore, researchers have focused on applications that increase stress tolerance or mitigate stress damage. These include various fertilizers, hormones, enzymes, etc., and are generally called biostimulants because they increase plant growth and development. Astaxanthin, considered a good biostimulant candidate in recent years, is one of them. Astaxanthin is a carotenoid pigment known as one of the most effective natural antioxidants. It plays an active role in photo oxidative stress management, lipid peroxidation, and stress tolerance in plants. Information of astaxanthin regarding the effects of stress on plants is insufficient, and the number of studies conducted on this subject is quite limited. This study provides general information on the effects and uses of astaxanthin in plants under abiotic stress conditions, based on existing research.

Keywords: astaxanthin, salinity, drought, stress, tolerance, biostimulant

BİTKİLERDE ABİYOTİK STRESLER VE ASTAKSANTİN

Prof. Dr., MELEK EKİNCİ

Atatürk Üniversitesi,
ekincim@tauni.edu.tr - 0000-0002-7604-3803

Doç. Dr., ESMA YİĞİDER

Atatürk Üniversitesi,
esma.yigider@atauni.edu.tr- 0000-0002-6896-0193

Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM

Atatürk Üniversitesi,
ertanyil@tauni.edu.tr - 0000-0003-3369-0645

Prof. Dr., MURAT AYDIN

Atatürk Üniversitesi,
maydin@tauni.edu.tr - 0000-0003-1091-0609

ÖZET

Dünya genelinde değişen iklim ve toprak koşulları, özellikle tarımsal üretimi etkilemektedir. Bu olumsuz faktörler, bitki büyümesini ve gelişimini, dolayısıyla verimi ve kaliteyi azaltmaktadır. Bu düşüş, önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Tarımda, abiyotik stresler (tuzluluk, kuraklık, sıcaklık, UV ve ağır metal) bitkilere önemli zararlar vermektedir. Bu nedenle, araştırmacılar stres toleransını artıran veya stres hasarını hafifleten uygulamalara odaklanmıştır. Bunlar arasında çeşitli gübreler, hormonlar, enzimler vb. bulunmakta ve genellikle bitki büyümesini ve gelişimini artırdıkları için biyostimülanlar olarak adlandırılmaktadırlar. Son yıllarda iyi bir biyostimülan adayı olarak kabul edilen astaksantin de bunlardan biridir. Astaksantin, etkili doğal antioksidanlardan biri olarak bilinen bir karotenoid pigmentidir. Bitkilerde foto-oksidatif stres yönetimi, lipid peroksidasyonu ve abiyotik stres toleransında aktif rol oynar. Astaksantin bitkiler üzerindeki stres etkileriyle ilgili bilgiler yetersizdir ve bu konuda yapılan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, mevcut araştırmalara dayanarak, astaksantin bitkilerde abiyotik stres koşulları altındaki etkileri ve kullanımları hakkında genel bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: astaksantin, tuzluluk, kuraklık, stres, tolerans, biyostimülan

1. INTRODUCTION

In agricultural production, plants encounter various adverse factors. The most significant of these are abiotic stresses caused by changing climate conditions. Environmental factors such as high and low temperatures, drought, UV radiation, salinity and heavy metals disrupt cellular balance and plant metabolism, thereby restricting plant growth. In response to these stressors,

plants develop many defense reactions to survive, such as slowing down the rate of photosynthesis, closing their stomata to prevent water loss, and synthesizing various molecules to balance osmotic pressure.

Astaxanthin (Ast) is a carotenoid widely used to provide the pink color in various seafood aquacultures, and synthetic Ast is also heavily used in the global market. However, recently, natural sources of the pigment such as the red yeast *Phaffia rhodozyma*, the green algae *Haematococcus pluvialis* and shellfish are being evaluated. Astaxanthin is a pigment belonging to the xanthophyll family, which are oxygenated derivatives of carotenoids, and its synthesis in plants is derived from lycopene. Astaxanthin also possesses antioxidant properties similar to those of α -tocopherol or β -carotene. It is attributable to its antioxidant activity, it is also considered to have the potential to protect the organism against certain diseases and disorders in humans (Higuera-Ciapara et al., 2006). It has been noted, Ast has higher antioxidant activity than β -carotene and is approximately a thousand times more effective than vitamin E. It is naturally found in many marine organisms such as trout, shrimp, and microalgae, as well as in some fungi, bacteria, and flowering plants, protecting hosts against environmental stress and adverse conditions (Zhang et al., 2020). Under stress, various green algae accumulate secondary ketocarotenoids such as Ast. Astaxanthin accumulation increases cellular resistance to oxidative stress caused by adverse conditions such as excessive UV-B radiation, light and nutritional stress, thus leading to higher cell survival (Lemoine and Schoefs, 2010). Information regarding the effects and uses of Ast in plants is insufficient, but it is known that it may have significant effects through certain mechanisms.

The most significant effect of abiotic stress in plants is the excessive accumulation of reactive oxygen species (ROS) that damage cells. In this situation, the plant's defense mechanism can be activated by the production of powerful antioxidants such as Ast to combat the resulting oxidative stress. Therefore, Ast is a molecule that should be considered in plant stress tolerance. However, studies in this area are insufficient. While information on the effect, mechanism of action, and use of Ast against various stresses is lacking, this study provides some information on its potential effects and uses.

2. ABIOTIC STRESS

Plants are subjected to a great deal of stress due to environmental factors. Agricultural production, in particular, is meaningfully affected by salinity, drought, UV radiation, heavy metals, and heat stress.

Salinity is one of the most common abiotic stresses encountered in agricultural production. It is a highly damaging factor due to the osmotic stress and ionic toxicity it causes in plants (Arif et al., 2020). High salt concentration in the soil solution reduces the plant's water potential, hindering water uptake and causing physiological drought. Furthermore, the accumulation of Na and Cl ions within the cells prevents the transport of essential nutrients such as K, disrupting the metabolic process (Sheldon et al., 2017; Arif et al., 2020). This ionic imbalance and water loss lead to a decrease in photosynthetic capacity, ROS accumulation, damage to the cell membrane, and consequently tissue death, resulting in shortened plant height, chlorosis, and

reduced leaf, shoot, and root development. All of these cause significant crop losses, resulting in economic damage to the producer (Majeed and Muhammad, 2019; Shahid et al., 2020).

Drought stress, another abiotic stress factor, reduces water potential in plants and affects various morphological, physiological, biochemical, and molecular processes. The stress caused by decreasing water levels in the soil, which leads to the transport of ABA synthesized in the roots to the leaves and the activation of ion channels causing stomatal closure, prevents water loss through transpiration but also reduces photosynthetic activity by restricting CO₂ uptake (Liu et al., 2022). Dehydration, protein degradation, lipid peroxidation, and cell membrane damage occurring in plant cells lead to excessive ROS accumulation (Farooq et al., 2009). Osmotic regulation occurs through the synthesis of antioxidant enzymes such as CAT and SOD, and osmoprotective molecules such as glycine betaine and proline, in response to oxidative damage caused by increased ROS levels (Farooq et al., 2009; Iqbal, 2018). In the long term, drought stress leads to deterioration of the root/shoot ratio, reduction in leaf area, breakdown of chlorophylls, and impaired ATP synthesis, resulting in wilting and plant death (Farooq et al., 2009; Anjum et al., 2011).

Increased heavy metal accumulation in water and soil due to industrialization, mining, and intensive agricultural activities is another factor causing damage to crop production. Toxic metals such as As, Cd, Cr, and Pb are absorbed by plant roots via the transport system and cause serious physiological and biochemical disorders in cells (Proshad et al., 2018; Madhu and Sadagopan, 2020). Heavy metals cause lipid peroxidation in the cell membrane and structural damage in organelles such as chloroplasts and mitochondria. By reducing chlorophyll synthesis and decreasing stomatal conductivity, they disrupt photosynthesis and respiration, leading to reduced plant growth and yield losses (Nowicka, 2022). Furthermore, oxidative stress occurs due to increased ROS associated with heavy metal accumulation. The activity of antioxidant defense enzymes such as APX, CAT, and SOD increases, leading to DNA damage and protein degradation at the cellular level, resulting in morphological, physiological, and molecular stress responses in the plant (Syta et al., 2013; Mansoor et al., 2023).

In plants, UV stress, particularly caused by UV-B radiation, disrupts cellular homeostasis by leading to excessive ROS production in organelles (mitochondria and chloroplasts etc.), resulting in protein degradation, lipid peroxidation, and nucleic acid damage (Sharma et al., 2017; Pathak et al., 2019). Furthermore, under stress, the plant attempts to minimize oxidative damage through the activation of antioxidant enzymes, and tries to maintain the functionality of the photosynthetic apparatus, resulting in morphological changes such as height decrease and leaf thickening (Pathak et al., 2019).

Heat stress in plants is a stress factor that occurs when temperatures below or above the optimum temperature range for plants cause cellular and physiological damage (Hasanuzzaman et al., 2013). Increased membrane fluidity, ion leakage, and protein degradation due to high temperatures damage photosystem II, reducing photosynthetic activity. Disruptions in electron transport lead to ROS accumulation and oxidative stress. Plants attempt to protect themselves in this situation by activating antioxidant enzymes and heat shock proteins (Hasanuzzaman et al., 2013; Djanaguiraman et al., 2018). At low temperatures, membrane rigidity increases,

enzyme activity slows down, and the resulting ice crystals damage the cell structure. During this process, plants try to adapt by altering their membrane lipid composition and accumulating osmoprotectants (Sardoei and Fazeli-Nasab, 2025). All these processes lead to a decrease in plant growth and yield.

3. ASTAXANTHIN ON ABIOTIC STRESSES

The effect of Ast on abiotic stresses in plants has not yet been clearly established. It is known that increased endogenous Ast in response to stress provides a protective mechanism for the plant, and significant benefits are also obtained through exogenous applications. However, the number of studies, particularly those focusing on exogenous applications, is quite limited. This study presents examples from research conducted by different researchers on various plants, based on a literature review.

In plants, Ast can reduce the damage caused by excessive sunlight to cells by accumulating in areas close to the cell wall and absorbing light at levels too high for chlorophyll to handle, thus converting it into heat and filtering the light and by protecting chlorophyll breakdown and maintaining the photosynthesis mechanism (He et al., 2020; Nair et al., 2023; Nishida et al., 2023). It also plays an effective role against ROS that form in the cells of stressed plants. Its long conjugated double bond chain captures and neutralizes ROS. In addition, it neutralizes singlet oxygen without damaging the plant's DNA and proteins. Astaxanthin has the ability to extend to both sides of the cell membrane, physically strengthening it under stress and preventing lipid peroxidation (Song et al., 2022; Nishida et al., 2023; Mekawy et al., 2024; Shah et al., 2025).

Indeed, the investigations carried out, it has been observed that mangrove species living in high-salinity environments accumulate Ast in their leaves to protect against high salt levels, thus providing the plant with a protective mechanism against excessive salinity (Chowdhury et al., 2017). Studies based on this naturally occurring adaptive ability in plants have shown that external application of Ast also produces similar tolerance-enhancing effects. Soaking salt-sensitive rice seeds in Ast resulted in Ast -treated plants returning to levels similar to those of unstressed plants. In Ast -untreated plants, hydrogen peroxide (H₂O₂), malondialdehyde (MDA), and electrolyte leakage rate concentrations decreased, while leaf catalase, peroxidase, and ascorbate peroxidase activities increased. Under salt stress, leaf Na⁺ concentration and Na⁺/K⁺ ratio decreased with Ast application, and the expression of OsBHY, OsSOS1, OsNHX1, and OsHKT1;5 genes increased. General, it was stated that seed soaking in Ast induced salinity tolerance in salt-sensitive rice varieties by reducing oxidative stress damage and increasing shoot Na⁺/K⁺ balance; so, seed soaking systems using Ast could function as a good strategy to improve the cultivation of salt-sensitive rice varieties in saline soils (Mekawy et al., 2024). This effect of Ast, which underlies stress tolerance through increased antioxidant capacity and decreased lipid peroxidation, has also been supported in a study conducted on strawberry plants. A study investigating the effects of Ast (0, 5, 10, 50, 100, and 200 mol/L) on the growth and resistance of strawberry tissue culture seedlings under salinity found that, compared to control groups, treatment with 5, 10, 50, and 100 mol/L Ast increased chlorophyll, ascorbic acid, and catalase (CAT) antioxidant capacity, while decreasing MDA. This suggests that Ast may improve the physiological activity and increase salt tolerance of strawberry

seedlings (Zhong et al., 2018). Current research shows that nanotechnological approaches are also highly effective in increasing the effectiveness of Ast, and it is stated that the nanotechnological form of Ast can increase tolerance to salt stress. Indeed, Ast gold nanoparticles (Ast-AuNPs), synthesized using Ast and chloroauric acid, stimulated tetrapyrrole biosynthesis while reducing oxidative stress caused by high salinity in 10-day-old rice seedlings grown hydroponically under high salinity (150 mM NaCl) stress for seven days (Song et al., 2022). Astaxanthin's role in salt stress tolerance is also due to its activation of enzymes and various genes, and its modification of gene pathways. Furthermore, proline, MDA, and H₂O₂ levels were significantly reduced, while antioxidant enzyme activities and the expression of ROS scavenging genes in the leaves were increased with the addition of Ast-AuNPs under salt stress. The researchers suggest that Ast-AuNPs may advantage rice seedlings in coping with high salt stress by stimulating scavenging ROS, tetrapyrrole biosynthesis, and enhancing antioxidant activity (Song et al., 2022).

The multifaceted role of Ast in the plant defense system is also relevant in terms of heavy metal stress and heavy metal accumulation, which are other significant threats besides salinity. For example, it was determined that 100 µM Ast alleviated Cd toxicity in wheat seedlings by increasing carotenoid content, photosynthesis, and total antioxidant capacity, growth, reducing MDA and H₂O₂ levels, Cd accumulation, and increasing Cd tolerance in wheat plants by promoting the expression of genes related to detoxification and photosynthesis (Ozavize et al., 2024). The success of Ast in heavy metal resistance has been confirmed not only through external applications but also by genetically enriching the plant with this substance. In one study, when comparing biologically Ast-enriched tobacco (T-ATX) and wild-type (SNN) tobacco seedlings, T-ATX plants exhibited higher root length, plant height, leaf area, and biomass under Pb stress compared to SNN plants, and showed higher chlorophyll levels, antioxidant enzyme activities, non-enzymatic antioxidants and photosynthetic efficiency (Du et al., 2025). It was determined that the Pb content and Pb translocation coefficient in various organs of the tobacco plant were lower in Ast-enriched tobacco (T-ATX), and numerous genes and metabolites associated with antioxidant defense mechanisms, carotenoid metabolism, Pb ion transport, detoxification pathways, and plant hormone signal transduction were significantly upregulated in T-ATX tobacco plants (Du et al., 2025). In the T-ATX tobacco genotype, endogenous ATX enriched with ATX significantly improved the plant's stress tolerance by strengthening the maintaining cellular structural integrity, antioxidant protection system, reducing Pb absorption and translocation, and upregulating detoxification and connected signaling pathways (Du et al., 2025).

Furthermore, the use of nanotechnology in obtaining nanotechnological Ast forms has also been shown to have tolerance-enhancing effects in plants under heavy metal stress. For example, when the effect of Ast nanoparticles (AstNPs) on mitigating Cd stress in wheat was investigated, it was determined that hydroponic application of AstNPs (100 mg L⁻¹) to Cd-affected wheat plants significantly increased shoot dry weight, shoot height, N and P concentration compared to untreated seedlings. Furthermore, a decrease in Cd translocation was observed in AstNPs-treated plants, resulting in a reduced Na⁺ content and an improved nutrient profile (N, P, K⁺, and Ca²⁺) (Zeshan et al., 2022). It was determined that AstNPs restrict the

translocation of Cd transporter genes (TaHMA3 and TaHMA2) to the above-ground parts of the plant and activate the antioxidant system by triggering the expression of TaSOD and TaPOD genes, thus protecting plants from oxidative damage (Zeshan et al., 2022). Application of AstNPs improved the physicochemical profiles of stressed wheat plants by maintaining nutrient uptake and ionic homeostasis in Cd-affected wheat plants (Zeshan et al., 2022). Similarly, it has been determined that Ast in the form of gold (Au) nanoparticles (Ast-AuNPs) can more effectively alleviate Cd toxicity in rice plants compared to Ast alone (Dai et al., 2021). When Ast-AuNPs were added to the medium, it was found to significantly reduce Cd levels in rice roots and leaves, restore chlorophyll biosynthesis, and alleviate Cd-induced oxidative stress (Dai et al., 2021). In rice under Cd stress, Ast-AuNPs reduced the content of superoxide anion (O_2^-), MDA, and H_2O_2 , while increasing the activity of SOD, POD, and CAT (Dai et al., 2021). It was determined that Ast-AuNPs supplementation inhibited the gene expression of Cd-induced metal transporter genes (OsIRT1, OsIRT2, OsNramp1, OsNramp5, OsHMA2, AND OsHMA3,) in rice roots (Dai et al., 2021).

There is strong evidence that Ast may also be an effective defense component against various abiotic stressors. Due to its chemical structure and high conjugated double bond system, Ast has a much higher single oxygen scavenging and free radical scavenging capacity than other carotenoids. While the protective effects of Ast on plants under salt and heavy metal stress are supported by concrete data in the literature, its interaction with other stresses in higher plants is still limited. It is well known that Ast acts as a strong light-protective agent against UV radiation in microalgae and protects cellular integrity under drought-induced dehydration conditions.

4. CONCLUSION

In summary, the existing literature reveals that Ast plays a multifaceted and critical role in enhancing tolerance of abiotic stress in plants. This powerful carotenoid, which functions as a protective shield in its natural habitat, appears to be able to build resistance against various environmental threats through external application to seeds and plants, and through its transfer to agricultural products using modern nanotechnology methods.

REFEFENCES

- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., and Lei, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032, 2011.
- Arif, Y., Singh, P., Siddiqui, H., Bajguz, A., and Hayat, S. Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 64-77, 2020.
- Chowdhury, G. R., Agarwal, S., and Mitra, A. Astaxanthin Pattern in Mangroves: A Case of Species-Specificity. *Biomed. J. Sci. Tech. Res*, 10, 2017.
- Dai, S., Wang, B., Song, Y., Xie, Z., Li, C., Li, S., and Jiang, M. Astaxanthin and its gold nanoparticles mitigate cadmium toxicity in rice by inhibiting cadmium translocation and uptake. *Science of the Total Environment*, 786, 147496, 2021.

- Djanaguiraman, M., Boyle, D. L., Welti, R., Jagadish, S. V. K., and Prasad, P. V. V. Decreased photosynthetic rate under high temperature in wheat is due to lipid desaturation, oxidation, acylation, and damage of organelles. *BMC plant biology*, 18(1), 55, 2018.
- Du, Z., Liang, M., Wang, X., Liu, Y., Du, S., Shi, D., and Xue, J. Astaxanthin biofortification enhances tobacco tolerance to lead stress through boosting antioxidant defense, reducing Pb accumulation, and modulating detoxification pathways. *Journal of Advanced Research*, 2025.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., and Basra, S. M. *Plant drought stress: effects, mechanisms and management*. In Sustainable agriculture (pp. 153-188). Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Roychowdhury, R., and Fujita, M. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*, 14(5), 9643-9684, 2013.
- He, B., Hou, L., Zhang, F., Cong, X., Wang, Z., Guo, Y., and Zang, X. Ultrastructural changes of *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyta) in process of astaxanthin accumulation and cell damage under condition of high light with acetate. *Algae*, 35(3), 253-262, 2020.
- Higuera-Ciapara, I., Félix-Valenzuela, L., and Goycoolea, F. M. Astaxanthin: a review of its chemistry and applications. *Critical reviews in food science and nutrition*, 46(2), 185-196, 2006.
- Iqbal, M. J. Role of osmolytes and antioxidant enzymes for drought tolerance in wheat. *Global wheat production*, 51, 51-66, 2018.
- Lemoine, Y., and Schoefs, B. Secondary ketocarotenoid astaxanthin biosynthesis in algae: a multifunctional response to stress. *Photosynthesis research*, 106(1), 155-177, 2010.
- Liu, H., Song, S., Zhang, H., Li, Y., Niu, L., Zhang, J., and Wang, W. Signaling transduction of ABA, ROS, and Ca²⁺ in plant stomatal closure in response to drought. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23), 14824, 2022.
- Madhu, P. M., and Sadagopan, R. S. Effect of heavy metals on growth and development of cultivated plants with reference to cadmium, chromium and lead—a review. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 16(3), 84-102, 2020.
- Majeed, A., and Muhammad, Z. *Salinity: a major agricultural problem—causes, impacts on crop productivity and management strategies*. In Plant abiotic stress tolerance: Agronomic, molecular and biotechnological approaches (pp. 83-99). Cham: Springer International Publishing, 2019.
- Mansoor, S., Ali, A., Kour, N., Bornhorst, J., AlHarbi, K., Rinklebe, J., and Chung, Y. S. Heavy metal induced oxidative stress mitigation and ROS scavenging in plants. *Plants*, 12(16), 3003, 2023.

- Mekawy, A. M. M., Assaha, D. V., Li, J., and Ueda, A. Astaxanthin application enhances salinity tolerance in rice seedlings by abating oxidative stress effects and enhancing Na⁺/K⁺ homeostatic balance. *Plant Growth Regulation*, 103(3), 609-623, 2024.
- Nair, A., Ahirwar, A., Singh, S., Lodhi, R., Lodhi, A., Rai, A., and Vinayak, V. Astaxanthin as a king of ketocarotenoids: structure, synthesis, accumulation, bioavailability and antioxidant properties. *Marine drugs*, 21(3), 176, 2023.
- Nishida, Y., Berg, P. C., Shakersain, B., Hecht, K., Takikawa, A., Tao, R., and Maoka, T. Astaxanthin: past, present, and future. *Marine Drugs*, 21(10), 514, 2023.
- Nowicka, B. Heavy metal-induced stress in eukaryotic algae—mechanisms of heavy metal toxicity and tolerance with particular emphasis on oxidative stress in exposed cells and the role of antioxidant response. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 16860-16911, 2022.
- Ozavize, S. F., Qiu, C. W., and Wu, F. Astaxanthin induces plant tolerance against cadmium by reducing cadmium uptake and enhancing carotenoid metabolism for antioxidant defense in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 210, 108622, 2024.
- Pathak, J., Rajneesh, Ahmed, H., Singh, D. K., Singh, P. R., Kumar, D., and Sinha, R. P. Oxidative stress and antioxidant defense in plants exposed to ultraviolet radiation. *Reactive oxygen, nitrogen and sulfur species in plants: production, metabolism, signaling and defense mechanisms*, 371-420, 2019.
- Proshad, R., Kormoker, T., Mursheed, N., Islam, M. M., Bhuyan, M. I., Islam, M. S., and Mithu, T. N. Heavy metal toxicity in agricultural soil due to rapid industrialization in Bangladesh: a review. *International Journal of Advanced Geosciences*, 6(1), 83-88, 2018.
- Sardoei, A. S., and Fazeli-Nasab, B. Physiological and Molecular Mechanisms of Freezing in Plants. *Phyton* (0031-9457), 94(6), 2025.
- Shah, F. I., Imran, H., Akram, F., Khalid, T., and Shehzadi, S. Marine carotenoids: Unlocking advanced antioxidant mechanisms and therapeutic applications for oxidative stress. *Molecular Biotechnology*, 1-18, 2025.
- Shahid, M. A., Sarkhosh, A., Khan, N., Balal, R. M., Ali, S., Rossi, L., and Garcia-Sanchez, F. Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development. *Agronomy*, 10(7), 938, 2020.
- Sharma, S., Chatterjee, S., Kataria, S., Joshi, J., Datta, S., Vairale, M. G., and Veer, V. A review on responses of plants to UV-B radiation related stress. *UV-B Radiation: From Environmental Stressor to Regulator of Plant Growth*, 75-97, 2017.
- Sheldon, A. R., Dalal, R. C., Kirchhof, G., Kopittke, P. M., and Menzies, N. W. The effect of salinity on plant-available water. *Plant and Soil*, 418(1), 477-491, 2017.

- Song, Y., Zheng, C., Basnet, R., Li, S., Chen, J., and Jiang, M. Astaxanthin synthesized gold nanoparticles enhance salt stress tolerance in rice by enhancing tetrapyrrole biosynthesis and scavenging reactive oxygen species in vitro. *Plant Stress*, 6, 100122, 2022.
- Sytar, O., Kumar, A., Latowski, D., Kuczynska, P., Strzałka, K., and Prasad, M. N. V. Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. *Acta physiologiae plantarum*, 35(4), 985-999, 2013.
- Zeshan, A., Abdullah, M., Adil, M. F., Wei, D., Noman, M., Ahmed, T., and Shamsi, I. H. Improvement of morpho-physiological, ultrastructural and nutritional profiles in wheat seedlings through astaxanthin nanoparticles alleviating the cadmium toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 126511, 2022.
- Zhang, C., Chen, X., and Too, H. P. Microbial astaxanthin biosynthesis: recent achievements, challenges, and commercialization outlook. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(13), 5725-5737, 2020.
- Zhong, Y., Luo, Y., Ge, C., Mo, Q., Lin, Y. J., Luo, S., and Tang, H. R. (2018, February). Effect of astaxanthin on the growth and resistance of strawberry seedling under salt stress. In 2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017) (pp. 2139-2143). Atlantis Press.

IRON BIOFORTIFICATION IN CEREALS: FROM PLANT GENETICS TO PRECISION BREEDING STRATEGIES

Assoc. Prof. Dr., ESMA YIGIDER

Atatürk University,
esma.yigider@atauni.edu.tr- 0000-0002-6896-0193

Prof. Dr., MELEK EKINCI

Atatürk University,
ekincim@atauni.edu.tr - 0000-0002-7604-3803

Prof. Dr., MURAT AYDIN

Atatürk University,
maydin@atauni.edu.tr - 0000-0003-1091-0609

Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM

Atatürk University,
ertanyil@atauni.edu.tr - 0000-0003-3369-0645

ABSTRACT

Concerns about food and nutritional security are growing amid rapid global population growth and mounting pressure on agricultural systems. The world population has already surpassed 8 billion people, with a forecast of reaching approximately 9.6–9.8 billion by 2050, substantially increasing demand for nutrient-rich food production. Iron (Fe) deficiency is among the most prevalent micronutrient deficiencies globally, leading to anemia, impaired mental development, and reduced productivity, especially in developing regions. Consequently, crop Fe biofortification has emerged as a cost-effective and sustainable approach to increase the concentration and bioavailability of Fe in edible plant tissues. This review focuses on recent advances in plant genetics and molecular mechanisms involved in Fe uptake, transport, homeostasis, and storage, with an emphasis on major transporter families and regulatory networks. Through functional genomics, characterization of transcriptional regulation and signaling pathways in plant responses to Fe deficiency has improved, and mechanisms that initiate the mobilization of mineral reserves within plants are better understood. These insights have facilitated the adoption of precision breeding strategies, including marker-assisted selection, genomic selection, transgenic approaches, and genome editing. Despite significant advances, challenges persist, including genotype-dependent variation, limited mineral bioavailability due to antinutritional compounds, and complex gene-environment interactions that affect Fe accumulation. Combining multi-omics analyses with precision breeding platforms will be critical to overcoming these limitations. Overall, Fe biofortification represents a key junction of plant genetics and next-generation breeding, offering a promising strategy to combat hidden hunger by providing nutritionally enhanced crops.

Keywords: Biofortification, CRISPR/Cas9, Hidden Hunger, Iron, Sustainability

TAHILLARDA DEMİR BİYOFORTİFİKASYONU: BİTKİ GENETİĞİNDEN HASSAS ISLAH STRATEJİLERİNE

Doç. Dr., ESMA YİĞİDER

Atatürk Üniversitesi,

esma.yigider@atauni.edu.tr- 0000-0002-6896-0193

Prof. Dr., MELEK EKİNCİ

Atatürk Üniversitesi,

ekincim@atauni.edu.tr - 0000-0002-7604-3803

Prof. Dr., MURAT AYDIN

Atatürk Üniversitesi,

maydin@atauni.edu.tr - 0000-0003-1091-0609

Prof. Dr., ERTAN YILDIRIM

Atatürk Üniversitesi,

ertanyil@atauni.edu.tr - 0000-0003-3369-0645

ÖZET

Küresel nüfus artışının hızlanması ve tarım sistemleri üzerindeki baskının artmasıyla birlikte gıda ve beslenme güvenliğine ilişkin endişeler giderek artmaktadır. Dünya nüfusu 8 milyarı aşmış olup, 2050 yılına kadar yaklaşık 9,6-9,8 milyara ulaşması öngörülmektedir; bu da besin açısından zengin gıda üretimine olan talebi önemli ölçüde artırmaktadır. Demir (Fe) eksikliği, küresel olarak en yaygın mikro besin eksikliklerinden biridir ve özellikle gelişmekte olan bölgelerde anemiye, bilişsel gelişim bozukluğuna ve verimlilik azalmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, bitkilerde Fe biyofortifikasyonu, yenilebilir bitki dokularında Fe konsantrasyonunu ve biyoyararlanımını artırmak için uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu inceleme, Fe alımında, taşınmasında, homeostazında ve depolanmasında rol oynayan bitki genetiği ve moleküler mekanizmalardaki son gelişmelere, özellikle de ana taşıyıcı ailelerine ve düzenleyici ağlara odaklanmaktadır. Fonksiyonel genomik yoluyla, bitkilerin Fe eksikliğine verdiği tepkilerde transkripsiyonel düzenleme ve sinyal yollarının karakterizasyonu iyileştirilmiş ve bitkilerde mineral rezervlerinin harekete geçirilmesini başlatan mekanizmalar daha iyi anlaşılmıştır. Bu bilgiler, marker destekli seleksiyon, genomik seleksiyon, transgenik yaklaşımlar ve genom düzenleme dahil olmak üzere hassas ıslah stratejilerinin benimsenmesini kolaylaştırmıştır. Önemli ilerlemelere rağmen, genotip bağımlı varyasyon, antinutrisyonel bileşikler nedeniyle sınırlı mineral biyoyararlanımı ve demir birikimini etkileyen karmaşık gen-çevre etkileşimleri gibi zorluklar devam etmektedir. Çoklu omik analizlerini hassas ıslah platformlarıyla birleştirmek, bu sınırlamaların üstesinden gelmek için kritik önem taşıyacaktır. Genel olarak, Fe biyofortifikasyonu, bitki genetiği ve yeni nesil ıslahın önemli bir kesişim noktasını temsil etmekte ve besin açısından zenginleştirilmiş ürünler sağlayarak gizli açlıkla mücadele için umut vadeden bir strateji sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyofortifikasyon, CRISPR/Cas9, Gizli Açlık, Demir, Sürdürülebilirlik

1. INTRODUCTION

According to the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, malnutrition is a global nutritional problem that encompasses insufficient energy intake and micronutrient deficiencies (FAO, 2023). Beyond undernutrition, malnutrition encompasses protein deficiencies and obesity, resulting in significant health and developmental consequences, particularly among pregnant women, children, and older adults (Mbuya et al. 2019; Tomasiewicz et al. 2024; Ebadi & Selamoglu, 2025). Micronutrient deficiencies, commonly termed "hidden hunger," are described by inadequate intake of critical vitamins and minerals, affecting billions globally (Kumar et al. 2023). Unlike overt hunger, hidden hunger often remains undetected because individuals may consume sufficient calories while lacking essential micronutrients required for proper physiological functioning (White & Broadley, 2009; Burchi et al. 2011). The burden of this problem is especially severe in low- and middle-revenue countries (LMICs), where food insecurity is exacerbated by agricultural inefficiencies and economic instability (Kunlure, 2025).

Among essential micronutrients, iron (Fe) is crucial for organisms, playing a key role in numerous metabolic processes (Shukla et al. 2018). In humans, Fe is an essential micronutrient that is tightly regulated and crucial for oxygen transport and energy metabolism. Its absorption and bioavailability are influenced by dietary factors (Wessling-Resnick, 2017). Fe deficiency is the leading reason of anemia worldwide and is associated with decreased cognitive development in children, slowed physical activity and work efficiency in adults, compromised immune function, and increased maternal and perinatal mortality rates (Lopez et al. 2016; Bahgat et al. 2022; Solberg & Reikvam, 2023; Leung et al. 2024; Obeagu, 2025). Chronic Fe deficiency can impair brain development and diminish overall quality of life, especially in at-risk populations (Korczak et al. 2024). In addition to its physical consequences, Fe deficiency imposes significant economic burdens on developing nations due to diminished labor productivity and increased healthcare expenditures (Hunt, 2002; Blank et al. 2019). In plants, Fe is equally vital, playing a fundamental role in chlorophyll synthesis, photosynthesis, and respiration (Rout & Sahoo, 2015). However, despite its prevalence in Earth's crust, the bioavailability of Fe in soils is frequently limited, particularly under calcareous and alkaline conditions, leading to inadequate Fe accumulation in cereal grains (Ramzani et al. 2016).

In developing regions, micronutrient insufficiency is linked to limited dietary diversity and the dominance of cereal and plant-based intakes that contain relatively low levels of bioavailable minerals compared with animal-based foods (Rawat et al. 2013). Furthermore, anti-nutritional substances such as phytic acid, protease inhibitors, lectins, alkaloids, tannins, oxalates, and fibers reduce mineral bioavailability by inhibiting intestinal absorption (Tadele, 2015; Ram et al. 2020; Abera et al. 2023). Processing operations, including polishing, milling, and pearling of cereals, further diminish micronutrient content by removing mineral-rich outer layers of the grain (White & Broadley, 2009). In addition to dietary and processing constraints, environmental factors, including elevated soil pH, high temperatures, low organic matter, and

inadequate soil fertility management, reduce Fe availability for crops in calcareous soils, thereby limiting Fe accumulation in these crops (Ramzani et al. 2016). Given the global frequency of Fe deficiency, biofortification of staple cereals is an applicable strategy to increase mineral intake and improve human nutrition (Naveed et al. 2020).

Despite substantial progress in understanding Fe metabolism in plants, notable gaps remain in translating molecular insights into stable, high-yield biofortified grain varieties. The intricate regulation of Fe uptake, transport, storage, and grain loading, together with genotype × environment interactions, poses significant hurdles for breeding efforts. A comprehensive synthesis of recent advances in plant genetics and precision breeding techniques is crucial to accelerate the development of nutritionally improved cereal crops. Confronting these challenges is essential to enhancing crop nutritional quality and promoting global food and nutritional safety in a sustainable approach.

2. IRON METABOLISM IN PLANTS

2.1. Iron Uptake and Transport Mechanisms in Plants

Plants have improved two separate strategies to obtain Fe from the rhizosphere, overcoming its extremely low solubility in aerobic soils (Kobayashi & Nishizawa, 2012). Non-graminaceous plants employ Strategy I, characterized by coordinated induction of rhizosphere acidity, ferric reduction, and ferrous transport (Pereira et al. 2014). The H⁺-ATPase AHA2 is the main isoform responsible for proton excretion, which lowers soil pH and increases the solubility of ferrous Fe (Morrissey & Guerinot, 2009). After solubilization, the membrane-bound ferric reduction oxidase 2 (FRO2) reduces Fe(III) to the more soluble Fe(II) (Liang, 2022). Ferrous ions are then transferred into root epidermal cells by the divalent metal transporter iron-regulated transporter 1 (IRT1) (Sathyaseelan et al. 2025).

In contrast, Strategy II plants, including grasses, produce mugineic acid (MAs) family phytosiderophores (PS) that strongly bind to Fe(III) (Yoneyama, 2021). The production of MAs and the uptake of MA-chelated Fe are significantly increased under Fe deficiency (Kobayashi et al. 2005). The Fe(III)-PS complexes are then absorbed by yellow stripe (YS) or yellow stripe-like (YSL) transmembrane proteins (Song et al. 2024). Alongside these essential proteins, the PDR9 transporter assists in the production of coumarins, supporting Fe uptake, especially in alkaline environments (Tsai & Schmidt, 2017). It has been shown that all genes activated by Fe deficiency, which are involved in Fe absorption, contain a higher frequency of iron-deficiency-responsive cis-acting elements IDE1 and IDE2 homologous sequences in their promoter regions (Kobayashi et al. 2010). Rice, a graminaceous species, employs a dual strategy for Fe acquisition, absorbing Fe³⁺ via DMA-mediated chelation (Strategy II) and directly importing Fe²⁺ via the transporters OsIRT1 and OsIRT2 (Ishimaru et al. 2006; Li et al. 2019).

Upon entering the root symplast, Fe is bound to several chelators to keep it soluble and prevent its participation in the formation of harmful hydroxyl radicals (Kim & Guerinot, 2007). Fe

movements symplastically through the connected cytoplasm of root tissue via a diffusion gradient before being transported into the xylem vessels (Kobayashi & Nishizawa, 2012). The MATE family transporter FRD3 enables citrate efflux into the xylem, supporting Fe–citrate complex formation and allowing long-distance Fe transport from roots to shoots (Roschztardtz et al. 2011). Fe is mainly transferred in the xylem as Fe(III)–citrate complexes, which move to the shoots via the transpiration stream (Morrissey & Guerinot, 2009). For developing organs with low transpiration rates, such as seeds and shoot apices, Fe must be redistributed through the phloem to ensure sufficient supply to sink tissues (Briat et al. 2015).

Nicotianamine (NA), with a molecular weight of 303, is a crucial metabolite found in most higher plants (Curie et al. 2009). NA is produced by NA synthase (NAS) from three molecules of S-adenosylmethionine (SAM) and serves as a key precursor in the biosynthesis of MAs (Liu et al. 2026). After root cells take up Fe(II)-MA, Fe(III)-MA, and Zn(II)-MA complexes, the metal ions are released and subsequently chelated by NA, forming Fe(II)-NA, Fe(III)-NA, and Zn(II)-NA complexes (Seregin & Kozhevnikova, 2023). Functionally, NA acts as an essential chelator in the phloem, forming stable complexes with Fe at neutral or mild alkaline pH conditions (Hell & Stephan, 2003). When roots are deprived of Fe, the genes *NAS2* and *NAS4* are activated, suggesting that NA plays a part in the movement of iron from roots to shoots (Klatte et al. 2009). Fe-NA complex overloading into the phloem is largely dependent on YSL transporters, particularly those in the YSL gene family (Morrissey & Guerinot, 2009). In some species, including the castor bean, an 11 kDa dehydrin referred to as iron transport protein (ITP) selectively binds Fe(III) in the phloem (Kim & Guerinot, 2007). The redirection of Fe from older leaves to actively growing sinks is a highly controlled process that relies on these specialized chelators and transporters (Hell & Stephan, 2003).

2.2. Subcellular Iron Homeostasis and Compartmentalization

Cellular Fe dynamics are carefully regulated to ensure adequate supply for essential metabolic processes such as photosynthesis and respiration while preventing excessive accumulation that may cause cellular toxicity (Gayomba et al. 2015; Berger et al. 2023). Up to 80% of the Fe in leaf cells is usually located in chloroplasts, making these organelles the primary Fe sinks in plants (Martín-Barranco et al. 2021). The ferric chelate reductase 7 (FRO7) and the transporter permease chloroplast 1 (PIC1), which are found in the inner envelope membrane, are necessary for the import of Fe into the chloroplast (Jeong & Connolly, 2009). In the plastid stroma, Fe is stored by ferritin, an Fe-storage protein that can sequester up to 4,500 Fe atoms (Briat et al. 2006). The plant vacuole acts as an essential storage site, sequestering excess Fe to prevent cytosolic toxicity (Ram et al. 2021). The vacuolar iron transporter 1 (VIT1) enables Fe loading into the seed vacuole, which is needed for correct Fe distribution in the embryo (Kim et al. 2006; Briat et al. 2015). Through germination, the release of Fe from vacuolar stores is controlled by the natural resistance-associated macrophage proteins NRAMP3 and NRAMP4 (Lanquar et al. 2005). Plant mitochondria require Fe for essential metabolic processes such as heme production, mitochondrial respiration, and the association of iron–sulfur (Fe–S) clusters (Vigani & Hanikenne, 2017; Przybyla-Toscano et al. 2021). Transporters such as mitochondrial

iron transporter (MIT) play a key function in delivering Fe to mitochondria and are important for normal growth and development (Kobayashi & Nishizawa, 2012). Because free Fe is greatly reactive and potentially harmful, it must remain tightly bound to specific proteins that regulate its availability and maintain intracellular Fe homeostasis (Morrissey & Guerinot, 2009). Collectively, this coordinated system of organellar sequestration, transport, and remobilization allows plants to maintain cellular Fe balance in response to environmental fluctuations (Liang, 2022).

3. BREEDING STRATEGIES FOR IRON BIOFORTIFICATION

One sustainable way to fight hidden hunger is through biofortification, which seeks to enhance staple crops with nutrients (Sharma et al. 2017). Biofortification is a strategy aimed at raising mineral and vitamin levels in the edible parts of plants during growth, and it can be achieved through various approaches, such as traditional plant breeding, agronomic applies, and genetic engineering (Bhatnagar et al. 2011).

3.1. Conventional Breeding

Among biofortification methods, conventional breeding is strategically important because it has higher consumer acceptance, fewer legal barriers, and no extra operating costs compared to genetic engineering (Singh et al. 2016; Shahzad et al. 2021; Azeem et al. 2025). The conventional breeding method involves screening natural genetic diversity in existing germplasm or wild relatives to identify genotypes with high Fe content. Then, these lines are crossed with high-yielding varieties, and the desired nutritional content is combined with agronomic traits through several generations of selection (Tessema et al. 2026). For example, *Triticum dicoccoides* and *Aegilops tauschii*, two wild relatives of cultivated wheat, have been identified as rich sources of genetic diversity and have been effectively employed in breeding programs to increase grain Fe levels in contemporary wheat varieties (Cakmak et al. 2004; Rawat et al. 2009). The rice variety IR68144, a hybrid of IR8 and Taichung (Native)-1, has been detected as a high-Fe genotype and is widely used in rice biofortification programs (Gregorio, 2000; Gregorio, 2002). During this process, investigating genotype x environment (G×E) interactions to ensure the stability of Fe accumulation under diverse environmental conditions and to guarantee that no yield loss occurs are critical steps (Xu et al. 2024).

Indeed, in recent years, thanks to conventional breeding efforts by HarvestPlus and similar international programs, many biofortified varieties of Fe-rich staple crops have been obtained and introduced into production in numerous countries (Sharma et al. 2017; Maqbool et al. 2020; Senguttuvel & Govindaraj, 2023; Singh et al. 2025). Fe-enriched dry bean varieties (e.g., HM 21-7, RWR 2154) that are becoming widespread in Rwanda and the Democratic Republic of Congo, along with high-Fe pearl millet varieties (e.g., Dhanashakti) developed in India, represent the most concrete examples of the success of traditional breeding in combating hidden hunger (Govindaraj et al. 2019; Antoine et al. 2020; Luna et al. 2020). However, conventional plant breeding alone may not always be sufficient due to challenges such as long development

times, linkage drag risk, and limited genetic variation; this underscores the need for other methods in biofortification research (Singer et al. 2021; Gudi et al. 2022).

3.2. Agronomic Biofortification

Agronomic biofortification includes the treatment of mineral fertilizers to soil or foliage to enhance the micronutrient content in the consumable portions of plants (Bhardwaj et al. 2022). This strategy, designed specifically to promote micronutrient security within food security policies, is an effective tool for combating malnutrition in regions where plant-based diets predominate (Jan et al. 2020). This process, which involves transferring micronutrients from plants to food and ultimately to the human body, can vary with environmental and genetic factors, including organic matter content, soil pH, and plant genotype (Sharma et al. 2020). Agronomic biofortification methods are typically classified into two types: soil and foliar applications. In soil applications, micronutrients are applied directly to the soil before or during planting; but, in high-pH or calcareous soils, mineral availability to plants may be limited by mineral fixation (De Valença et al. 2017). In foliar applications, fertilizer solutions are sprayed directly onto plant leaves, enabling quick nutrient absorption into plant tissues. This method is regarded as effective, especially for increasing mineral content in cereal grains (Cakmak, 2008). Ramzan et al. (2020) show that the Fe content of wheat grains, which was 43.33 mg kg⁻¹ in the control group, increased to 78.33 mg kg⁻¹ with the foliar application of 1% FeSO₄. Foliar application of Fe fertilizers considerably raises cereal Fe concentration in wheat, rising from 29.5 mg kg⁻¹ in the control group to 37.8 mg kg⁻¹ after FeSO₄ application (Zhang et al. 2010). A global meta-analysis revealed that Fe fertilization increased Fe concentrations in wheat grain by about 20.5% compared with unfertilized controls (Zhou et al. 2024). Meta-analyses demonstrate that micronutrient fertilization can enhance Fe and Zn contents in maize grains by up to 31% compared with conventional fertilization trainings (Kihara et al. 2024).

3.3. Genetic and Molecular Approaches

3.3.1. Marker-Assisted Selection (MAS)

Understanding the transport mechanisms and genetic capacity of Fe in plants is necessary for the success of biofortification efforts and ensuring sustainability in plant production. Marker-assisted selection (MAS) is a modern breeding method that allows the identification of chosen genes or traits at early developmental stages using molecular markers (Gao & Li, 2025). This approach quickly and reliably detects target genes using DNA markers linked to a specific phenotypic trait (Singh & Singh, 2015). Hence, selection can occur at the genetic level before plants display a phenotype (Collard & Mackill, 2008). One of the main benefits of the MAS method is that genetic selection can be carried out without environmental factors influencing it (Boopathi, 2020). MAS is especially effective for traits controlled by major genes or a small number of quantitative trait loci (QTLs) (Xu & Crouch, 2008). This approach has been used to develop plant varieties with elevated micronutrient levels for Fe fortification. Successfully identifying gene-specific SSR markers that boost Fe (VTL) and zinc (Zn) (NAM-B1)

accumulation in wheat while restricting cadmium (Cd) levels, this establishes a strategic scientific foundation for developing nutrient-rich and safe genotypes through MAS (Rasheed et al. 2023). Basnet & Khanal (2022) identified numerous QTLs and SNPs associated with gene families such as YS, NRAMP, and ferritin in their study on Fe and Zn bioaccumulation in maize, demonstrating that these genetic loci have significant potential to increase microelement accumulation in endosperm through MAS. QTL analyses conducted on the IR64 × Azucena rice population have shown that phytate content is controlled by genetic loci distinct from those controlling Fe and Zn accumulation, which could enable the development of varieties with low phytate but high Fe and Zn concentration using MAS (Stangoulis et al. 2007).

3.3.2. Transgenic Approaches

Transgenic approaches are modern engineering methods used to improve genotypes by directly transferring specific genes into targeted genotypes to alter metabolic pathways (Saini et al. 2022). These methods provide a crucial alternative when there is restricted natural genetic variation in a species' gene pool for traditional breeding, or when the crop is unsuitable for such methods (Kumar et al. 2019). Numerous significant agronomic genes have been extracted from diverse species, cloned, and utilized to create appropriate constructs for plant transformation (Low et al. 2018; Munaweera et al. 2022). Techniques such as Agrobacterium-mediated transformation and particle gun (biolistic) gene delivery have been optimized and are now used to genetically modify multiple plant species (Gosal & Wani, 2018). Transgenic strategies for Fe biofortification aim to enhance Fe uptake by roots, improve its long-distance transport inside the plant, and increase its storage in edible tissues such as seed endosperm (Masuda et al. 2013; Basu, 2016; Kumar et al. 2019). Ferritin genes, especially those from soybeans, have been successfully expressed in staple grains like rice and wheat under endosperm-specific promoters to boost Fe storage area capacity (Borg et al. 2006; Khalekuzzaman et al. 2006). Boonyaves et al. (2016) showed that co-expressing the Arabidopsis-derived *AtIRT1* gene with ferritin and *NAS* genes in rice significantly increased grain Fe levels, reaching approximately $9.6 \mu\text{g g}^{-1}$ in dry weight. Tsakirpaloglou et al. (2023) demonstrated that rice lines co-expressing dicot-derived ferritin genes with *OsNAS2* had Fe content in polished grains increased to around $13 \mu\text{g g}^{-1}$ and Zn to $50 \mu\text{g g}^{-1}$, indicating potential to meet biofortification goals. Gupta et al. (2023) demonstrated that transgenic rice lines expressing ferritin genes from *Phaseolus vulgaris* and *Pennisetum glaucum* in the endosperm, along with *OsNAS2*, increased grain Fe and Zn content by about 4.2 and 3.5 times, respectively. In wheat, endosperm-specific expression of the *TaVIT2* gene significantly increased Fe in the flour fraction (Connorton et al. 2017). Abid et al. (2017) demonstrated that wheat endosperm expressing the phytase gene (*phyA*) from *Aspergillus japonicus* greatly improved Fe and Zn bioavailability by lowering phytate levels. Ishimaru et al. (2010) found that overexpressing the *OsYSL2* gene in rice's phloem and developing seeds regulates Fe transport inside the plant, and that its overexpression under proper promoters can boost Fe concentration in polished rice grains by 4.4 times.

3.3.3. Genome Editing Approaches

The CRISPR/Cas9 approach is an adaptive immune strategy used by bacteria against foreign genetic elements, and it is a powerful tool that creates double-strand breaks in targeted genomic regions via an RNA-guided nuclease complex (Hryhorowicz et al. 2017; Demirci et al. 2018; Janik et al. 2020). DNA breaks created by the CRISPR/Cas9 system are repaired by endogenous cellular pathways, such as homologous recombination (HDR) or non-homologous end-joining (NHEJ) (Yang et al. 2020). This can follow in targeted gene deletions, insertions, or sequence changes, enabling the creation of specific mutations at genomic locations (Liao et al. 2024). This technology stands out for being much more economical, faster, more precise, and suitable for multiple-gene editing than traditional breeding methods or genome editing systems such as zinc finger nucleases (ZFNs) and transcription activator-like effector nucleases (TALENs) (Bortesi & Fischer, 2015; Jaganathan et al. 2018). One of the key advantages of genome editing technologies is the capability to generate “transgene-free” plants without inserting foreign DNA; this enables these plants to be evaluated similarly to traditional breeding products in many countries and helps with regulatory approval (He & Zhao, 2020; Mushtaq et al. 2021). This approach of targeting and regulating genes involved in Fe uptake, transport, and storage enhances the Fe content in cereals (Khan et al. 2024). Ibrahim et al. (2022) used the CRISPR/Cas9 system to target the *TaIPK1* gene in wheat and demonstrated that this reduced grain phytic acid content, thereby increasing Fe and Zn accumulation and bioavailability. Nguyen et al. (2025) augmented Fe accumulation in rice by CRISPR/Cas9-mediated modification of the Fe transporter gene *OsNRAMP7*, achieving an 18–72% increase in grain Fe content while preserving essential agronomic features. The *TaHRZ1* and *TaHRZ2* genes, which regulate Fe homeostasis in wheat, were identified, and editing the *TaHRZ1* gene with CRISPR-Cas9 increased grain Fe accumulation, particularly in the embryo (scutellum) region, in the modified lines. CRISPR/Cas9-generated *osvit1/osvit2* double mutants increased Fe accumulation in rice grains and demonstrated that *OsVIT* transporters are key genes regulating the internal distribution of Fe inside the plant (Benato et al. 2025).

4. CONCLUSION

Iron deficiency remains one of the most important micronutrient deficits impacting human health, especially in areas where grain-based diets are prevalent. Therefore, raising the Fe content and bioavailability of staple foods has become a key priority in ensuring global food safety. Recent advancements in plant molecular biology and genetics have enhanced our comprehension of the systems governing iron uptake, transport, storage, and grain loading in plants. These reports have contributed to the identification of key components, including carrier proteins, chelator molecules, and transcriptional regulators, that regulate Fe homeostasis. Various breeding strategies have been developed for Fe biofortification. While traditional breeding methods leverage natural genetic variation, agronomic biofortification can boost mineral accumulation quickly through fertilization practices. Additionally, marker-assisted selection enables quick identification of genes linked to micronutrient accumulation. Transgenic approaches and genome-editing technologies, such as CRISPR/Cas systems, offer powerful tools for next-generation biofortification. Future research is likely to focus on developing high-yielding, nutritionally enhanced cereal varieties by integrating multi-omics

approaches, functional genomics analyses, and precise breeding techniques. These comprehensive strategies will be essential in fighting hidden hunger and creating sustainable food systems.

REFERENCE

- Abera, S., Yohannes, W., & Chandravanshi, B. S. (2023). Effect of processing methods on antinutritional factors (oxalate, phytate, and tannin) and their interaction with minerals (calcium, iron, and zinc) in red, white, and black kidney beans. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2023(1), 6762027.
- Abid, N., Khatoon, A., Maqbool, A., Irfan, M., Bashir, A., Asif, I., ... & Malik, K. A. (2017). Transgenic expression of phytase in wheat endosperm increases bioavailability of iron and zinc in grains. *Transgenic research*, 26(1), 109-122.
- Alaba Samson Kunlere. Strategies to address food insecurity and improve global nutrition among at-risk populations. *International Journal of Science and Research Archive*, 2025, 14(02), 1657-1680. Article DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.2.0564>.
- Antoine, K. L., Roger, K. V., Emery, K. L., Adrien, K. M., & Chirwa, R. M. (2020). Biofortified bean genotypes under integrated soil fertility management across sub-humid agro-ecological zones of The Democratic Republic of Congo. *African Journal of Agricultural Research*, 16(10), 1384-1400.
- Azeem, A., Khan, S., Zia Ul Haq, M., Shafiq, S., Aslam, M. T., Munir, S., & Sikandar Zaman, M. (2025). Biofortification strategies for enhancing crop nutritional value: a review of methods, challenges, and future directions. *Discover Plants*, 2(1), 185.
- Bahgat, K. A. E., Nasr, H. M., & El-Sayed, S. K. (2022). Effect of iron deficiency on behavior and cognition in children. *International Journal of Health Sciences*, 6(S7), 998-1011.
- Basnet, B., & Khanal, S. (2022). Quantitative trait loci and candidate genes for iron and zinc bio-fortification in genetically diverse germplasm of maize (*Zea mays* L): A systematic review. *Heliyon*, 8(12).
- Basu, P. S. (2016). Physiological Processes Toward Movement of Micronutrients from Soil to Seeds in Biofortification Perspectives. *Biofortification of Food Crops*, 317-329.
- Berger, N., Marin, A. J., Stassen, M. J., Lourenço, T., Li, M., Watanabe, S., ... & Dubos, C. (2023). Molecular regulation of iron homeostasis in plants. In *Progress in Botany Vol. 85* (pp. 75-103). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Bhardwaj, A. K., Chejara, S., Malik, K., Kumar, R., Kumar, A., & Yadav, R. K. (2022). Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1055278.
- Bhatnagar, M., Bhatnagar-Mathur, P., Reddy, D. S., Anjaiah, V., & Sharma, K. K. (2011). Crop biofortification through genetic engineering: present status and future directions.
- Blank, P. R., Tomonaga, Y., Szucs, T. D., & Schwenkglens, M. (2019). Economic burden of symptomatic iron deficiency—a survey among Swiss women. *BMC women's health*, 19(1), 39.
- Boonyaves, K., Gruissem, W., & Bhullar, N. K. (2016). NOD promoter-controlled AtIRT1 expression functions synergistically with NAS and FERRITIN genes to increase iron in rice grains. *Plant Molecular Biology*, 90(3), 207-215.

- Boopathi, N. M. (2020). Marker-assisted selection (MAS). In *Genetic mapping and marker assisted selection: Basics, practice and benefits* (pp. 343-388). Singapore: Springer Singapore.
- Borg, S., Agius, S., Kristiansen, K., & Holm, P. B. (2006). Wheat Ferritin: Fortification of wheat endosperm with bioavailable iron.
- Bortesi, L., & Fischer, R. (2015). The CRISPR/Cas9 system for plant genome editing and beyond. *Biotechnology advances*, 33(1), 41-52.
- Briat, J. F., Cellier, F., & Gaymard, F. (2006). Ferritins and iron accumulation in plant tissues. In *Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms* (pp. 341-357). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in plant science*, 20(1), 33-40.
- Burchi, F., Fanzo, J., & Frison, E. (2011). The role of food and nutrition system approaches in tackling hidden hunger. *International journal of environmental research and public health*, 8(2), 358-373.
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?. *Plant and soil*, 302(1), 1-17.
- Cakmak, İ., Torun, A. Y. F. E. R., Millet, E., Feldman, M., Fahima, T., Korol, A., ... & Özkan, H. (2004). Triticum dicoccoides: an important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat. *Soil science and plant nutrition*, 50(7), 1047-1054.
- Collard, B. C., & Mackill, D. J. (2008). Marker-assisted selection: an approach for precision plant breeding in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 557-572.
- Connorton, J. M., Jones, E. R., Rodríguez-Ramiro, I., Fairweather-Tait, S., Uauy, C., & Balk, J. (2017). Wheat vacuolar iron transporter TaVIT2 transports Fe and Mn and is effective for biofortification. *Plant physiology*, 174(4), 2434-2444.
- Curie, C., Cassin, G., Couch, D., Divol, F., Higuchi, K., Le Jean, M., ... & Mari, S. (2009). Metal movement within the plant: contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters. *Annals of botany*, 103(1), 1-11.
- De Valença, A. W., Bake, A., Brouwer, I. D., & Giller, K. E. (2017). Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global food security*, 12, 8-14.
- Demirci, Y., Zhang, B., & Unver, T. (2018). CRISPR/Cas9: an RNA-guided highly precise synthetic tool for plant genome editing. *Journal of cellular physiology*, 233(3), 1844-1859.
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Kaur, J., Verma, V., Singh, P., ... & Hossain, A. (2021). Enrichment of zinc and iron micronutrients in lentil (*Lens culinaris* Medik.) through biofortification. *Molecules*, 26(24), 7671.
- Ebadi, A. G., & Selamoglu, Z. (2025). Climate Change, Food Security, and Human Health: A Comprehensive Analysis of Global Problems and Sustainable Nutritional Plans. *Wah Academia Journal of Health and Nutrition*, 1(3), 39-46.
- FAO. (2023). *The state of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/measuring-hunger/en.02.03.2026>

- Gao, H., & Li, H. (2025). Marker-assisted selection (MAS) in soybean breeding. *Molecular Plant Breeding*, 16.
- Gayomba, S. R., Zhai, Z., Jung, H. I., & Vatamaniuk, O. K. (2015). Local and systemic signaling of iron status and its interactions with homeostasis of other essential elements. *Frontiers in Plant Science*, 6, 716.
- Gosal, S. S., & Wani, S. H. (2018). Plant genetic transformation and transgenic crops: methods and applications. In *Biotechnologies of Crop Improvement, Volume 2: Transgenic Approaches* (pp. 1-23). Cham: Springer International Publishing.
- Govindaraj, M., Rai, K. N., Cherian, B., Pfeiffer, W. H., Kanatti, A., & Shivade, H. (2019). Breeding biofortified pearl millet varieties and hybrids to enhance millet markets for human nutrition. *Agriculture*, 9(5), 106.
- Gregorio, G. B. (2002). Progress in breeding for trace minerals in staple crops. *The Journal of nutrition*, 132(3), 500S-502S.
- Gregorio, G. B., Senadhira, D., Htut, H., & Graham, R. D. (2000). Breeding for trace mineral density in rice. *Food and Nutrition Bulletin*, 21(4), 382-386.
- Gudi, S., Kumar, P., Singh, S., Tanin, M. J., & Sharma, A. (2022). Strategies for accelerating genetic gains in crop plants: special focus on speed breeding. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(10), 1921-1938.
- He, Y., & Zhao, Y. (2020). Technological breakthroughs in generating transgene-free and genetically stable CRISPR-edited plants: Technological breakthroughs in generating transgene-free and genetically.... *Abiotech*, 1(1), 88-96.
- Hell, R., & Stephan, U. W. (2003). Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. *Planta*, 216(4), 541-551.
- Hryhorowicz, M., Lipiński, D., Zeyland, J., & Słomski, R. (2017). CRISPR/Cas9 immune system as a tool for genome engineering. *Archivum immunologiae et therapiae experimentalis*, 65(3), 233-240.
- Hunt, J. M. (2002). Reversing productivity losses from iron deficiency: the economic case. *The Journal of nutrition*, 132(4), 794S-801S.
- Ibrahim, S., Saleem, B., Rehman, N., Zafar, S. A., Naeem, M. K., & Khan, M. R. (2022). CRISPR/Cas9 mediated disruption of Inositol Pentakisphosphate 2-Kinase 1 (TaIPK1) reduces phytic acid and improves iron and zinc accumulation in wheat grains. *Journal of Advanced Research*, 37, 33-41.
- Ishimaru, Y., Masuda, H., Bashir, K., Inoue, H., Tsukamoto, T., Takahashi, M., ... & Nishizawa, N. K. (2010). Rice metal-nicotianamine transporter, OsYSL2, is required for the long-distance transport of iron and manganese. *The Plant Journal*, 62(3), 379-390.
- Ishimaru, Y., Suzuki, M., Tsukamoto, T., Suzuki, K., Nakazono, M., Kobayashi, T., ... & Nishizawa, N. K. (2006). Rice plants take up iron as an Fe³⁺-phytosiderophore and as Fe²⁺. *The Plant Journal*, 45(3), 335-346.
- Jaganathan, D., Ramasamy, K., Sellamuthu, G., Jayabalan, S., & Venkataraman, G. (2018). CRISPR for crop improvement: an update review. *Frontiers in plant science*, 9, 985.
- Jahan, T. A., & Tar'an, B. (2023). Agronomic approach to iron biofortification in chickpea. *Agronomy*, 13(12), 2894.

- Jan, B., Bhat, T. A., Sheikh, T. A., Wani, O. A., Bhat, M. A., Nazir, A., ... & Rashid, A. (2020). Agronomic bio-fortification of rice and maize with iron and zinc: A review. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 21(16), 28-37.
- Janik, E., Niemcewicz, M., Ceremuga, M., Krzowski, L., Saluk-Bijak, J., & Bijak, M. (2020). Various aspects of a gene editing system—crispr-cas9. *International journal of molecular sciences*, 21(24), 9604.
- Jeong, J., & Connolly, E. L. (2009). Iron uptake mechanisms in plants: functions of the FRO family of ferric reductases. *Plant science*, 176(6), 709-714.
- Khalekuzzaman, M., Datta, K., Oliva, N., Alam, M. F., Joarder, O. I., & Datta, S. K. (2006). Stable integration, expression and inheritance of the ferritin gene in transgenic elite indica rice cultivar BR29 with enhanced iron level in the endosperm. *Indian Journal of Biotechnology*, 5(1), 26-31.
- Khan, A., Pudhuvai, B., Shrestha, A., Mishra, A. K., Shah, M. P., Koul, B., & Dey, N. (2024). CRISPR-mediated iron and folate biofortification in crops: Advances and perspectives. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 40(4), 4138-4168.
- Kihara, J., Sileshi, G. W., Bolo, P., Mutambu, D., Senthilkumar, K., Sila, A., ... & Saito, K. (2024). Maize-grain zinc and iron concentrations as influenced by agronomic management and biophysical factors: a meta-analysis. *Food Security*, 16(5), 1147-1173.
- Kim, S. A., & Guerinot, M. L. (2007). Mining iron: iron uptake and transport in plants. *FEBS letters*, 581(12), 2273-2280.
- Kim, S. A., Punshon, T., Lanzirotti, A., Li, L., Alonso, J. M., Ecker, J. R., ... & Guerinot, M. L. (2006). Localization of iron in Arabidopsis seed requires the vacuolar membrane transporter VIT1. *Science*, 314(5803), 1295-1298.
- Klatte, M., Schuler, M., Wirtz, M., Fink-Straube, C., Hell, R., & Bauer, P. (2009). The analysis of Arabidopsis nicotianamine synthase mutants reveals functions for nicotianamine in seed iron loading and iron deficiency responses. *Plant physiology*, 150(1), 257-271.
- Kobayashi, T., & Nishizawa, N. K. (2012). Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. *Annual review of plant biology*, 63, 131-152.
- Kobayashi, T., Nakanishi, H., & Nishizawa, N. K. (2010). Dual regulation of iron deficiency response mediated by the transcription factor IDEF1. *Plant Signaling & Behavior*, 5(2), 157-159.
- Kobayashi, T., Suzuki, M., Inoue, H., Itai, R. N., Takahashi, M., Nakanishi, H., ... & Nishizawa, N. K. (2005). Expression of iron-acquisition-related genes in iron-deficient rice is co-ordinately induced by partially conserved iron-deficiency-responsive elements. *Journal of Experimental Botany*, 56(415), 1305-1316.
- Korczak, A., Wójcik, E., Olek, E., Łopacińska, O., Stańczyk, K., Korn, A., ... & Czarnecka, K. (2024). The Long-Term effects of Iron Deficiency in Early Infancy on Neurodevelopment. *Journal of Education, Health and Sport*, 70, 51104-51104.
- Kumar, S., Palve, A., Joshi, C., & Srivastava, R. K. (2019). Crop biofortification for iron (Fe), zinc (Zn) and vitamin A with transgenic approaches. *Heliyon*, 5(6).
- Lanquar, V., Lelièvre, F., Bolte, S., Hamès, C., Alcon, C., Neumann, D., ... & Thomine, S. (2005). Mobilization of vacuolar iron by AtNRAMP3 and AtNRAMP4 is essential for seed germination on low iron. *The EMBO journal*, 24(23), 4041.

- Leung, A. K., Lam, J. M., Wong, A. H., Hon, K. L., & Li, X. (2024). Iron deficiency anemia: an updated review. *Current pediatric reviews*, 20(3), 339-356.
- Li, Q., Chen, L., & Yang, A. (2019). The molecular mechanisms underlying iron deficiency responses in rice. *International journal of molecular sciences*, 21(1), 43.
- Liang, G. (2022). Iron uptake, signaling, and sensing in plants. *Plant Communications*, 3(5).
- Liao, H., Wu, J., VanDusen, N. J., Li, Y., & Zheng, Y. (2024). CRISPR-Cas9-mediated homology-directed repair for precise gene editing. *Molecular Therapy Nucleic Acids*, 35(4).
- Liu, G., Sun, Y., He, P., Wang, Y., Zhang, Y., Li, Q., ... & Wang, Z. (2026). Identification of the Nicotianamine synthase (NAS) gene family in wheat (*Triticum aestivum* L.) and the role of its member TaNAS4-A in Zn and Fe transport. *Functional & Integrative Genomics*, 26(1), 11.
- Lopez, A., Cacoub, P., Macdougall, I. C., & Peyrin-Biroulet, L. (2016). Iron deficiency anaemia. *The Lancet*, 387(10021), 907-916.
- Low, L. Y., Yang, S. K., Kok, D. X. A., Ong-Abdullah, J., Tan, N. P., & Lai, K. S. (2018). Transgenic plants: gene constructs, vector and transformation method. In *New visions in plant science*. intechopen.
- Luna, S. V., Pompano, L. M., Lung'aho, M., Gahutu, J. B., & Haas, J. D. (2020). Increased iron status during a feeding trial of iron-biofortified beans increases physical work efficiency in Rwandan women. *The Journal of Nutrition*, 150(5), 1093-1099.
- Maqbool, A., Abrar, M., Bakhsh, A., Çalışkan, S., Khan, H. Z., Aslam, M., & Aksoy, E. (2020). Biofortification under climate change: the fight between quality and quantity. In *Environment, climate, plant and vegetation growth* (pp. 173-227). Cham: Springer International Publishing.
- Martín-Barranco, A., Thomine, S., Vert, G., & Zelazny, E. (2021). A quick journey into the diversity of iron uptake strategies in photosynthetic organisms. *Plant Signaling & Behavior*, 16(11), 1975088.
- Masuda, H., Aung, M. S., & Nishizawa, N. K. (2013). Iron biofortification of rice using different transgenic approaches. *Rice*, 6(1), 40.
- Masuda, H., Kobayashi, T., Ishimaru, Y., Takahashi, M., Aung, M. S., Nakanishi, H., ... & Nishizawa, N. K. (2013). Iron-biofortification in rice by the introduction of three barley genes participated in mugineic acid biosynthesis with soybean ferritin gene. *Frontiers in plant science*, 4, 132.
- Mbuya, N. V., Atwood, S. J., & Huynh, P. N. (2019). *Persistent malnutrition in ethnic minority communities of Vietnam: Issues and options for policy and interventions*. World Bank Publications.
- Morrissey, J., & Guerinot, M. L. (2009). Iron uptake and transport in plants: the good, the bad, and the ionome. *Chemical reviews*, 109(10), 4553-4567.
- Munaweera, T. I. K., Jayawardana, N. U., Rajaratnam, R., & Dissanayake, N. (2022). Modern plant biotechnology as a strategy in addressing climate change and attaining food security. *Agriculture & Food Security*, 11(1), 26.

- Mushtaq, M., Ahmad Dar, A., Skalicky, M., Tyagi, A., Bhagat, N., Basu, U., ... & El Sabagh, A. (2021). CRISPR-based genome editing tools: Insights into technological breakthroughs and future challenges. *Genes*, 12(6), 797.
- Naveed, M., Khalid, H., Ayub, M. A., Rehman, M. Z. U., Rizwan, M., Rasul, A., & Haq, M. A. U. (2020). Biofortification of cereals with zinc and iron: recent advances and future perspectives. *Resources use efficiency in agriculture*, 615-646.
- Nguyen, P. D. (2025). CRISPR-enhanced iron accumulation in TBR225 rice via OsNRAMP7 overexpression. *Journal of Plant Biotechnology*, 52(1), 51-59.
- Obeagu, E. I. (2025). The Impact of Anemia on the Immune System during Pregnancy: A Review. *International Journal of Medical Sciences and Pharma Research*, 11(1), 28-33.
- Paul, M., Thriveni, V., Niharika, M., Upadhyay, D. K., Kiro, D., Verma, A., & Patil, S. (2024). A review on biofortification of crops: A nutritional strategy for combating malnutrition. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 16(11), 63-77.
- Pereira, M. P., Santos, C., Gomes, A., & Vasconcelos, M. W. (2014). Cultivar variability of iron uptake mechanisms in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant physiology and biochemistry*, 85, 21-30.
- Przybyla-Toscano, J., Christ, L., Keech, O., & Rouhier, N. (2021). Iron–sulfur proteins in plant mitochondria: roles and maturation. *Journal of Experimental Botany*, 72(6), 2014-2044.
- Ram, H., Sardar, S., & Gandass, N. (2021). Vacuolar iron transporter (like) proteins: Regulators of cellular iron accumulation in plants. *Physiologia Plantarum*, 171(4), 823-832.
- Ram, S., Narwal, S., Gupta, O. P., Pandey, V., & Singh, G. P. (2020). Anti-nutritional factors and bioavailability: Approaches, challenges, and opportunities. *Wheat and barley grain biofortification*, 101-128.
- Ramzani, P. M. A., Khalid, M., Naveed, M., Irum, A., Khan, W. U. D., & Kausar, S. (2016). Iron biofortification of cereals grown under calcareous soils: problems and solutions. In *Soil science: Agricultural and environmental perspectives* (pp. 231-258). Cham: Springer International Publishing.
- Rasheed, A., Ahmad, J., Nadeem, M., Rashid, M. A. R., & Azeem, F. (2023). Microsatellite markers-aided dissection of iron, zinc and cadmium accumulation potential in *Triticum aestivum*. *PeerJ*, 11, e15229.
- Rawat, N., Neelam, K., Tiwari, V. K., & Dhaliwal, H. S. (2013). Biofortification of cereals to overcome hidden hunger. *Plant Breeding*, 132(5), 437-445.
- Rawat, N., Tiwari, V. K., Singh, N., Randhawa, G. S., Singh, K., Chhuneja, P., & Dhaliwal, H. S. (2009). Evaluation and utilization of *Aegilops* and wild *Triticum* species for enhancing iron and zinc content in wheat. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56(1), 53-64.
- Roschztardt, H., Séguéla-Arnaud, M., Briat, J. F., Vert, G., & Curie, C. (2011). The FRD3 citrate effluxer promotes iron nutrition between symplastically disconnected tissues throughout Arabidopsis development. *The Plant Cell*, 23(7), 2725-2737.
- Rout, G. R., & Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in agricultural science*, 3, 1-24.

- Saini, P. K., Bhati, J., Kumar, K., Goyal, G., Tripathi, S. K., Shukla, S., ... & Prasad, S. (2022). Biofortification of iron, zinc, and iodine in crops using transgenic techniques. *Opsearch: American Journal of Open Research*, 1(2), 48-61.
- Sathyaseelan, C., Nallusamy, S., Kannusamy, G., Chidambaram, L., Remadevi, R., & Shanmugam, V. (2025). Evolutionary and functional insights into FRO2 genes in *Oryza sativa*: comparative in silico analysis of iron uptake mechanisms across plant species. *Discover Plants*, 2(1), 37.
- Senguttuvel, P., G, P., C, J., CN, N., V, J., P, B., ... & Govindaraj, M. (2023). Rice biofortification: breeding and genomic approaches for genetic enhancement of grain zinc and iron contents. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1138408.
- Seregin, I. V., & Kozhevnikova, A. D. (2023). Nicotianamine: a key player in metal homeostasis and hyperaccumulation in plants. *International journal of molecular sciences*, 24(13), 10822.
- Shahzad, R., Jamil, S., Ahmad, S., Nisar, A., Khan, S., Amina, Z., ... & Zhou, W. (2021). Biofortification of cereals and pulses using new breeding techniques: current and future perspectives. *Frontiers in nutrition*, 8, 721728.
- Sharma, D., Ghimire, P., Bhattarai, S., Adhikari, U., Khanal, S., & Poudel, P. B. (2020). Biofortification of wheat: Genetic and agronomic approaches and strategies to combat Iron and Zinc deficiency. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 5(4).
- Sharma, P., Aggarwal, P., & Kaur, A. (2017). Biofortification: A new approach to eradicate hidden hunger. *Food Reviews International*, 33(1), 1-21.
- Shukla, A. K., Behera, S. K., Pakhre, A., & Chaudhari, S. K. (2018). Micronutrients in soils, plants, animals and humans. *Indian Journal of Fertilisers*, 14(3), 30-54.
- Singer, S. D., Laurie, J. D., Bilichak, A., Kumar, S., & Singh, J. (2021). Genetic variation and unintended risk in the context of old and new breeding techniques. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 40(1), 68-108.
- Singh, A., Kaul, S., Dikshit, H. K., & Kumar, S. (2025). From Deficiency to Sufficiency: Tackling Hidden Hunger with Biofortified Staples. In *Plant Breeding 2050: Next-Gen Crops* (pp. 79-101). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Singh, B. D., & Singh, A. K. (2015). Marker-assisted selection. In *Marker-assisted plant breeding: principles and practices* (pp. 259-293). New Delhi: Springer India.
- Singh, U., Praharaj, C. S., Chaturvedi, S. K., & Bohra, A. (2016). Biofortification: Introduction, approaches, limitations, and challenges. In *Biofortification of food crops* (pp. 3-18). New Delhi: Springer India.
- Solberg, A., & Reikvam, H. (2023). Iron status and physical performance in athletes. *Life*, 13(10), 2007.
- Song, Z., Li, S., Li, Y., Zhou, X., Liu, X., Yang, W., & Chen, R. (2024). Identification and characterization of yellow stripe-like genes in maize suggest their roles in the uptake and transport of zinc and iron. *BMC Plant Biology*, 24(1), 3.
- Stangoulis, J. C., Huynh, B. L., Welch, R. M., Choi, E. Y., & Graham, R. D. (2007). Quantitative trait loci for phytate in rice grain and their relationship with grain micronutrient content. *Euphytica*, 154(3), 289-294.

- Tadele, Y. (2015). Important anti-nutritional substances and inherent toxicants of feeds. *Food science and quality management*, 36, 40-47.
- Tessema, A. M., Abebe, F. M., Kidane, Y. G., Hailegiorgis, D., Tehulie, N. S., Hassen, A., ... & Ibrahim, S. (2026). Crop biofortification for enhanced nutritional density: Breeding, agronomical, and biotechnological strategies. *Crop Science*, 66(1), e70246.
- Tomasiewicz, A., Polański, J., & Tański, W. (2024). Advancing the understanding of malnutrition in the elderly population: current insights and future directions. *Nutrients*, 16(15), 2502.
- Tsai, H. H., & Schmidt, W. (2017). Mobilization of iron by plant-borne coumarins. *Trends in Plant Science*, 22(6), 538-548.
- Tsakirpaloglou, N., Bueno-Mota, G. M., Soriano, J. C., Arcillas, E., Arines, F. M., Yu, S. M., ... & Slamet-Loedin, I. H. (2023). Proof of concept and early development stage of market-oriented high iron and zinc rice expressing dicot ferritin and rice nicotianamine synthase genes. *Scientific Reports*, 13(1), 676.
- Tyagi, D., Banoo, H., Meena, V., Joon, R., Agrwal, K., Kumar, A., ... & Pandey, A. K. (2025). CRISPR/Cas9 editing of the wheat iron sensor TaHRZ1 confirms its conserved role in iron homeostasis and allocation in grains. *bioRxiv*, 2025-06.
- Vigani¹, G., & Hanikenne, M. (2017). Metal homeostasis in plant mitochondria. *Annual Plant Reviews, Plant Mitochondria*, 111.
- Wessling-Resnick, M. (2017). Iron: Basic nutritional aspects. In *Molecular, genetic, and nutritional aspects of major and trace minerals* (pp. 161-173). Academic Press.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New phytologist*, 182(1), 49-84.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New phytologist*, 182(1), 49-84.
- Xu, C., Wang, L., Yin, J., Qi, L., Feng, Y., Ji, Y., ... & Li, J. (2024). Wild relatives and new breeding techniques sustain Fe and Zn biofortified crop farming systems under climate change and emergencies. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2354475.
- Xu, Y., & Crouch, J. H. (2008). Marker-assisted selection in plant breeding: From publications to practice. *Crop science*, 48(2), 391-407.
- Yang, H., Ren, S., Yu, S., Pan, H., Li, T., Ge, S., ... & Xia, N. (2020). Methods favoring homology-directed repair choice in response to CRISPR/Cas9 induced-double strand breaks. *International journal of molecular sciences*, 21(18), 6461.
- Yoneyama, T. (2021). Iron delivery to the growing leaves associated with leaf chlorosis in mugineic acid family phytosiderophores-generating graminaceous crops. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(4), 415-426.
- Zhang, Y., Shi, R., Rezaul, K. M., Zhang, F., & Zou, C. (2010). Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(23), 12268-12274.

Zhou, C. X., Zhang, C. C., Zhao, Q. Y., Yu, B. G., Zhang, W., Chen, X. P., & Zou, C. Q. (2024). Iron biofortification and yield of wheat grain in response to Fe fertilization and its driving variables: A meta-analysis. *Global Food Security*, 40, 100737.

BAZI ÇİLEK ÇEŞİTLERİNİN KALİTE ÖZELLİKLERİ VE FARKLI KURUTMA YÖNTEMLERİNİN KURU MADDE İÇERİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Arş. Gör. Merve KARAKOYUN MUTLUAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi
merve.karakoyun@bilecik.edu.tr, 0000-0001-7438-4738

Zir. Müh. Enes Can AYDIN

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi
E-mail: en.can.ay@hotmail.com, 0009-0005-4912-2978

Doç. Dr. Sinem ÖZTÜRK ERDEM

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi
sinem.erdem@bilecik.edu.tr, 0000-0002-8978-0837

ÖZET

Bu çalışmada, Albion, Monterey ve San Andreas çilek çeşitlerinin kalite özellikleri incelemiş ve farklı kurutma yöntemlerinin (güneşte, gölgede ve 40°C, 50°C, 60°C etüvde kurutma) kuru madde içeriği üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Araştırma, 2024 yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yüksek tünel içerisinde yetiştirilen çilek çeşitlerinde fiziksel (meyve eni, boyu, ağırlığı, meyve eti sertliği), kimyasal (pH, titre edilebilir asitlik, suda çözünür kuru madde içeriği) ve kurutma sonrası toplam kuru madde miktarı belirlenmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek meyve eni ve ağırlığı San Andreas, en yüksek meyve boyu ise Albion çeşidinde elde edilmiştir. Kimyasal özellikler açısından en yüksek suda çözünür kuru madde içeriği San Andreas ve Monterey çeşitlerinde, en yüksek pH değeri San Andreas çeşidinde, en yüksek titre edilebilir asitlik ise Albion çeşidinde tespit edilmiştir.

Kurutma uygulamaları değerlendirildiğinde, en yüksek kuru madde içeriği güneşte ve gölgede kurutma yöntemleriyle elde edilmiştir. Özellikle Monterey çeşidinin, güneşte ve gölgede kurutma yöntemleriyle en yüksek kuru madde içeriğine ulaştığı belirlenmiştir. Kurutma sürecinde genetik faktörlerin yanı sıra çevresel koşulların da önemli rol oynadığı görülmüştür. Sonuç olarak, farklı çilek çeşitleri arasında incelenen parametreler anlamlı farklılıklar tespit edilmiş, en iyi kaliteyi koruyan kurutma yöntemi olarak güneşte ve gölgede kurutma ön plana çıkmıştır. Bu veriler, çilek kurutma sürecinde optimum koşulların belirlenmesi ve yüksek kaliteli kurutulmuş ürün üretimi açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: çilek, kalite, kurutma, meyve, nem içeriği

GİRİŞ

Türkiye, tarımsal üretim açısından verimli topraklara sahip olup, çeşitli meyve ve sebzelerin yetiştiriciliğine elverişli iklim koşullarına sahip bir ülkedir. Bu durum, geniş bir ürün yelpazesine olanak sağlamakta ve hasat edilen ürünlerde üretim fazlası oluştuğunda, raf ömrünün uzatılması ve kalite kaybının önlenmesi amacıyla etkin muhafaza yöntemlerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu yöntemler arasında, gıdalardaki suyun uzaklaştırılması esasına dayanan kurutma işlemi, meyve ve sebzelerin muhafazasında önemli bir yer tutmaktadır. Kurutma işlemi yalnızca ürünlerin nem içeriğini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda besin değerinin, duyuşal özelliklerin ve fiziksel görünümün korunmasına da katkıda bulunmakta; dolayısıyla yaygın olarak tercih edilen bir muhafaza yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Kowalska ve ark., 2018; Akharume ve ark., 2019).

Kurutma işlemi, geleneksel güneşte kurutma ve yapay kurutma teknikleri gibi farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Güneşte kurutma, düşük maliyetli bir yöntem olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmekle birlikte, ürünlerin çevresel faktörlere maruz kalmasına neden olarak renk değişimi ve besin kaybı gibi kaliteyi olumsuz etkileyen sorunlara yol açabilmektedir (Omolola ve ark., 2017). Buna karşılık, sıcak hava ile kurutma ve dondurarak kurutma gibi yapay kurutma yöntemleri, kontrollü ortam koşullarını sağlayarak söz konusu riskleri en aza indirmekte ve kurutulmuş ürünlerin kalite özelliklerini iyileştirmektedir.

Bilimsel adı *Fragaria* × *ananassa* olan çilek, yüksek besin değeri ve kendine özgü aroması nedeniyle dünya genelinde en çok tercih edilen meyvelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Çilek, A, B ve C vitaminlerinin yanı sıra kalsiyum, demir ve fosfor gibi temel mineraller bakımından zengin bir içeriğe sahiptir (Giampieri ve ark., 2012). Bu meyveye yönelik talebin artışı, yalnızca taze tüketimiyle sınırlı kalmayıp, reçel, jöle ve tatlı gibi işlenmiş gıda ürünlerinde yaygın olarak kullanılmasına da bağlanmaktadır (Čabilovski ve ark., 2023). Ayrıca, çileklerin ekonomik açıdan taşıdığı önem, özellikle diğer meyvelerin sınırlı olduğu mevsimlerde pazarlanabilirliğinin yüksek olmasıyla artmakta ve bu durum, üreticiler için kârlı bir fırsat sunmaktadır (Anderson ve Ponnusamy, 2023).

Çileklerin kurutulması, yalnızca raf ömrünü uzatmakla kalmayıp, aynı zamanda onları çeşitli gıda ürünleri için değerli bir bileşen haline getirmektedir. Kurutulmuş çilekler, yoğun aromaları ve besin değerleri sayesinde atıştırmalıklar ve tatlılar gibi farklı gıda ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Putri ve Falah, 2023). Bunun yanında, meyvelerde kurutma işleminin renk,

doku ve besin içeriği gibi fizikokimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirebildiğini ortaya koymaktadır (Omolola ve ark., 2017).

Bununla birlikte, tercih edilen kurutma yöntemi, ürünün duyu özellikleri üzerinde de belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle taze çileklere tat ve besin değeri açısından daha yakın özellikler taşıyan kurutulmuş ürünleri tercih eden tüketiciler açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, kurutma süreci boyunca çileklerin antioksidan özelliklerinde artış gözlemlenmekte olup, bu durum çilekleri kanserin önlenmesi ve kardiyovasküler sağlığın desteklenmesi gibi çeşitli sağlık yararları sunan fonksiyonel bir gıda bileşeni haline getirdiği bilinmektedir (Wojdyło ve ark., 2009).

Sonuç olarak, çileklerin kurutulması, tarımsal üretim ve gıda muhafazası açısından önemli bir süreci temsil etmektedir. Uygun kurutma yöntemlerinin kullanılmasıyla, çileklerin besin kalitesinin ve özelliklerinin korunması ayrıca raf ömürlerinin uzatılmasını mümkün hale getirmektedir. Kurutulmuş meyvelere yönelik talep artış göstermeye devam ederken, farklı kurutma tekniklerinin çileklerin kalite özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılması, üreticilerin tüketici beklentilerini karşılaması ve gıda güvenliği standartlarını sürdürmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Biyoaktif bileşiklerin korunmasını en üst düzeye çıkarmak ve kontaminasyon riskini en aza indirmek amacıyla kurutma süreçlerinin optimizasyonuna dikkat edilmelidir (Putri ve Falah, 2023). Bu çalışmada Albion, Monterey ve San Andreas çilek çeşitleri kullanılarak etüvde, güneşte ve gölgede kurutma yöntemleri uygulanmış ve en az kalite kaybına neden olan yöntem belirlenerek kurutulmuş ürünlerin kalite parametreleri değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (40°06'48.3''K, 30°00'08.4''D) bulunan yüksek tünel sera içerisinde ve laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma amacıyla kullanılan Albion, Monterey ve San Andreas çilek çeşitleri frigo fide olarak Çiltar A.Ş'den temin edilmiştir. Albion çeşiti, Diamante X Cal 94.16-1 arasındaki melezlemesinden elde edilmiş olup, Diamante ve Aromas çeşitlerinin iyi özelliklerinden oluşan kaliteli bir çeşittir. Nötr gün çeşidi olup, özellikle serin ve ılıman bölgelere adaptasyonu iyidir (Ateş ve Türemiş, 2015; Kandemir, 2016). Monterey (Albion × Cal 97.85-6) çeşidi, orta derecede nötr gün çeşididir. Meyve tadı düşük asitliğe sahip olmasından dolayı çok iyi olan bu çeşit, iri ve yumuşak meyvelere sahiptir. Meyvelerinin iriliği nedeniyle tüm dünyada tüketiciler tarafından tercih edilmektedir (Ateş ve Türemiş, 2015; Kandemir, 2016). San Andreas (Albion × Cal. 97.86-1) çeşidi de orta derecede nötr gün çeşidi

olup meyveleri güzel bir görünüme sahip, tadı iyi ve iri bir çeşittir. Bitki gücü fazla olup, hastalıklara karşı dayanıklı olduğu bilinmektedir (Kandemir, 2016; Erdem ve Çekiç; 2017).

Fidelerin dikimi için masura genişlikleri 70 cm, masura aralıkları 25 cm olacak şekilde masura yapılarak üzeri siyah sera taban örtüsü ile kaplanmıştır. Dikim masuralar üzerine 25 cm aralıklarla üçgen dikim şeklinde gerçekleştirilmiştir. Düzenli olarak hasat edilen meyvelerde, fiziksel, kimyasal ve kuru madde tayini için ölçüm ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Meyvelerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla, çalışma sonunda, her çeşite ait çileklerin meyve boyu ölçümü (cm), meyve eni ölçümü (mm), meyve ağırlıklarının belirlenmesi (g) ve meyve eti sertlikleri (kg/cm²) belirlenmiştir (Türemiş, 2003; Oğuz ve ark., 2017).

Meyvelerin kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla suda çözünür kuru madde içeriği (SÇKM), pH, titre edilebilir asitlikleri (TEA) belirlenmiştir (Cemeroğlu, 2007).

Kurutma denemesi, 2023 yılı temmuz ayı içerisinde, güneşlenmenin en yoğun ve yağış riskinin en düşük olduğu periyotta Bilecik ilinde yürütülmüştür. Bilecik Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan veriler incelendiğinde; 2023 yılı temmuz ayının, önceki yıla kıyasla daha yüksek bir sıcaklık ortalaması (≈25°C) olduğu belirlenmiştir. Düşük yağış miktarı ve yüksek sıcaklık değerleri, kurutma süreci için gerekli olan yüksek evaporasyon hızını desteklemiştir. Kuru madde tayini ise hasat edilen meyvelerin arasından sağlıklı olanlar seçilip 50 ile 60 g arasında tartılmıştır. Ardından petrilere alınan meyveler güneşte, gölgede ve etüvde (40, 50, 60 °C) ağırlık sabitlenene kadar tutulmuştur.

Kurutulacak çilek meyvelerinin başlangıç nem değerleri ile kurutma sonrası son nem değerleri kurutma dolabı yöntemiyle belirlenmiştir. 70°C sıcaklıkta ağırlıkları sabitlenene kadar kurutma dolabında bekletilen örneklerin nem içerikleri, aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Yağcıoğlu, 1999).

$$Nk = \frac{Wi - Ws}{Ws} \times 100$$

Nk: Kuru baza göre nem (%)

Wi : İlk ağırlık (g)

Ws : Son ağırlık (g)

Elde edilen sonuçlar kapsamındaki tüm veriler %5 anlamlılık düzeyinde (p < 0.05) varyans analizine tabi tutulmuş ve anlamlı fark gösteren ortalamalar Tukey'in çoklu karşılaştırma testi kullanılarak Minitab yazılımı ile karşılaştırılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Arazi koşullarında yetiştirilen çilek çeşitlerine ait meyvelerin en, boy, meyve eti sertliği ve meyve ağırlıkları, suda çözünür kuru madde (SÇKM), pH, titre edilebilir asitlik (TEA) ait veriler Tablo 1’de verilmiştir. En yüksek meyve eni Monterey (26.8 mm) ve San Andreas (26.6 mm) çeşitlerinden elde edilirken, en yüksek meyve boyu 34.61 mm Albion çeşitinden elde edilmiştir. Verim ve kaliteyi etkileyen meyve eni ve boyu bakımından farklılıklar gözlenmekte ve daha fazla sayıda tohumun döllemesini kolaylaştıran ve dolayısıyla daha büyük meyve boyutuna katkıda bulunan optimum tozlaşma koşullarından faydalanabildiğinden meyve boyu bakımından üstün özellik gösteren çeşitler bulunmaktadır (Dung ve ark., 2021). Hem meyve eni hem de meyve boyu bakımından genetik faktörler, çilek çeşitleri arasındaki meyve boyutu varyasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Farklı çilek çeşitlerinin genetik yapıları nedeniyle meyve verimi, sayısı ve boyutu açısından önemli farklılıklar sergilediğini göstermiştir (Mishra ve ark., 2015). Hancock ve Bringham (1988), farklı çeşitler arasında meyve boyutu için önemli bir genetik değişkenlik tanımlamıştır. Belirli özellikler için seçilimin gelişmiş meyve boyutlarına yol açabileceğini göstermiştir (Mishra ve ark., 2015). Elde edilen bulgulara göre bu bulguları desteklemekte ve genetik faktöre bağlı olarak çeşitler arasında meyve en ve boyunun değiştiği düşünülmektedir.

Çileklerin sertliği, öncelikle hücre duvarı bileşenlerinin, özellikle de meyvenin dokusunu ve genel kalitesini belirlemede kritik roller oynayan pektin, selüloz ve hemiselülozun bileşimi ve bozunmasından etkilenmektedir. Meyvelerin gelişme sırasında yumuşamasının, hemiselülozun bozunmasından ziyade pektinin çözünmesi ve depolimerizasyonu ile yakından ilişkili olduğu bilinmektedir (Anees ve ark., 2021). Üç farklı çilek çeşitinin meyve eti sertliklerine ait değerler Tablo 1’de verilmiştir. En yüksek meyve eti sertliğine 29.05 kg/cm² ile San Andreas çilek çeşitinden elde edilmiştir.

Meyve ağırlıklarının çeşitler arasında 12.73 g ile 19.76 g arasında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 1). Meyve ağırlıkları bakımından üç çilek çeşiti arasında en yüksek ağırlık 19.76 g ile San Andreas çilek çeşitinden elde edilmiştir (Tablo 1). Çileklerin meyve ağırlığının çeşit farklılığından ayrıca çevre koşullarından da etkileneceği bilinmektedir. Bir çalışmada Albion çeşidinin ortalama meyve ağırlığının (16.33 g) Camarosa, Amiga ve Sabrina gibi diğer çeşitlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Çolak, 2023). Çilek meyve ağırlığının, çeşit seçimi, tozlaşma verimliliği, mikrobiyal etkileşimler ve çevresel yönetim uygulamalarının kombinasyonundan etkilendiği bilinmektedir. Bu faktörlerin etkileşimi, çilek meyvelerinin

genel verimini ve kalitesini belirlemekte ve çilek yetiştiriciliğinde bütünleşik bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır (Diel ve ark., 2018).

Çilek çeşitlerinin suda çözünür kuru madde içerikleri (SÇKM), çilek meyvesinin tadını ve genel lezzet profilini etkileyen kritik bir parametredir. Yüksek SÇKM oranı genellikle daha iyi lezzet ve tüketici tercihi ile korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir (Schwieterman ve ark., 2014; Fan ve ark., 2021). Tablo 1’de bu çalışma sonucunda elde edilen SÇKM miktarları verilmiştir. En iyi suda çözünür kuru madde içeriği (%) San Andreas (%9.62) ve Monterey (%9.18) çeşitlerinden elde edilmiştir. Organik tarım uygulamalarının çileklerde SÇKM’yi artırdığı bilinmekte ve buna benzer yetiştirme koşulları altında San Andreas ile karşılaştırıldığında Monterey’de gözlemlenen daha yüksek değer elde edildiği bildirilmektedir (Domingues ve ark., 2018). Üç farklı çilek çeşiti arasında en yüksek pH içeriği 3.86 ile San Andreas çeşitinden elde edilmiştir (Tablo 1). Çileklerdeki birincil organik asitler, meyvenin genel asitliğini ve dolayısıyla pH seviyesini belirlemede önemli bir rol oynayan sitrik ve malik asitlerdir (Janurianti ve ark., 2021). Özdemir ve ark. (2003), Hatay koşullarında yürüttükleri bir çalışmada pH’nın 3.32–3.60 arasında, Oğuz ve ark. (2017) ise yaptıkları çalışmada 3.61-3.85 arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Çileklerin titre edilebilir asitliği (TEA), lezzetini, kalitesini ve genel tüketici isteklerini etkileyen kritik bir parametredir. Sitrik asit, çilek meyvesinde bulunan baskın organik asit olduğundan, titre edilebilir asitlik, toplam sitrik asit miktarı cinsinden ifade edilir (Abd-Elhady, 2014). Farklı çilek çeşitleri arasındaki TEA değişimleri genetik faktörlere, çevre koşullarına ve hasat sonrası işlem uygulamalarına bağlanabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, Albion çilek çeşiti en yüksek TEA içeriğine sahip olurken en düşük TEA içeriği 1.34 ile Monterey çeşidinde belirlenmiştir (Tablo 1). Çalışmamızla benzer şekilde Oğuz ve ark (2017), çeşitler arasında en yüksek TEA içeriğine Albion çeşidinden elde ettiğini bildirmiştir.

Tablo 1. Çilek çeşitlerinin fiziksel analizlerinin sonuçları

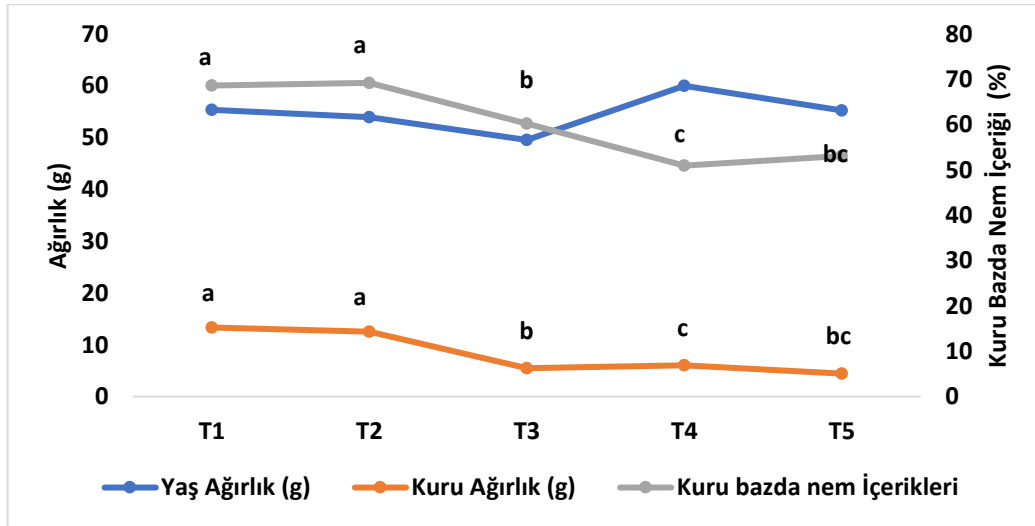
Çeşitler	Meyve boy (mm)	Meyve en (mm)	Meyve Sertlik (kg/cm ²)	Meyve Ağırlık (g)	SÇKM	pH	TEA (%)
Albion	19.19 b	34.61 a	21.96 b	14.79 b	8.84 b	3.02 b	2.62 a
Monterey	26.8 a	25.43 c	20.88 b	12.73 b	9.18 ab	3.16 b	1.34 c
San Andreas	26.6 a	29.25 b	29.05 a	19.76 a	9.62 a	3.86 a	1.64 b

Bu çalışma sonucunda, farklı kurutma uygulamaların (T1: Güneş, T2: Gölge, T3: Etüv-40 °C, T4: Etüv-50 °C, T5: Etüv-60 °C) bitki taze ağırlığı, kuru ağırlığı ve nem içeriği üzerindeki

etkilerinin istatistiksel olarak önemli ($p < 0.05$) olduğu bulunmuştur. Elde edilen verilere göre, Güneş (T1) ve gölge (T2) uygulamaları hem kuru ağırlık hem de kuru bazda nem oranı bakımından en yüksek değerleri göstermiştir. En iyi kuru madde içerikleri güneş (T1) (%68.58) ve gölge (T2) (%69.19) kurutma tekniklerinde belirlenmiştir. Güneş ve gölge kurutma yöntemi karşılaştırıldığında, bu yöntemlerin etüvde kurutmaya göre daha yüksek kuru madde içeriği sağlayabildiği gözlemlenmiştir.

Uygulama düzeylerinin değişmesiyle birlikte (T3'ten itibaren), incelenen parametrelerde belirgin bir düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle T4 (Etüv-50) uygulamasında taze ağırlık değerlerinde bir artış kaydedilmesine rağmen, kuru ağırlık ve nem içeriğinin en düşük seviyelerde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; T4 uygulamasının hücre içi su hacminde geçici bir artış sağlasa da yapısal biyokütle birikimi ve oransal su tutma kapasitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1 . Farklı kurutma uygulamalarının kuru madde içerikleri

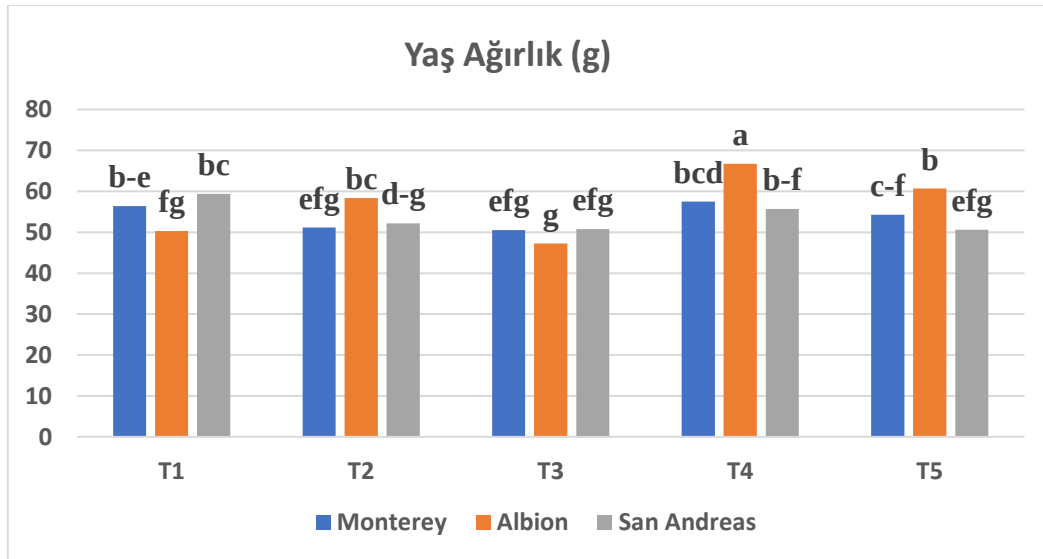


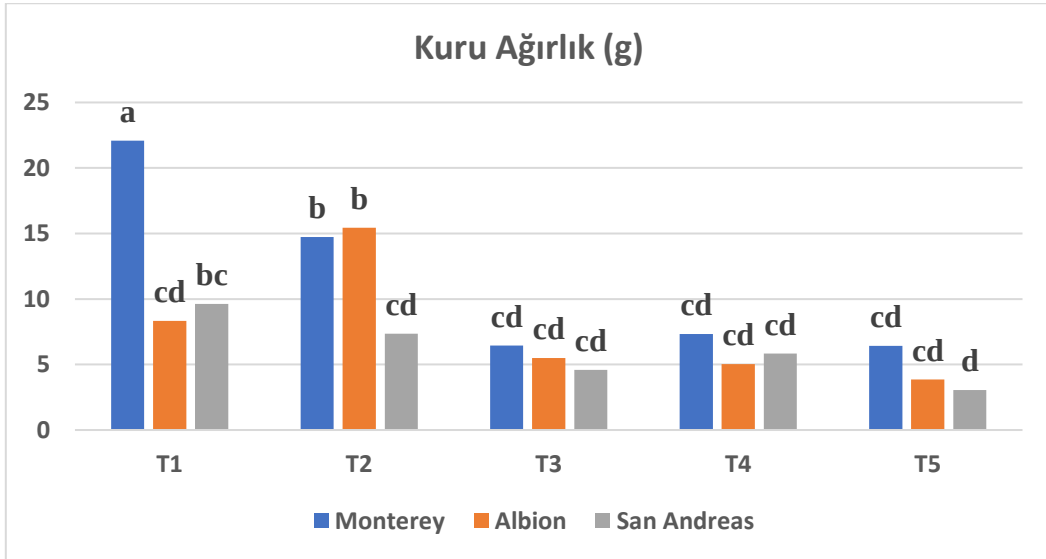
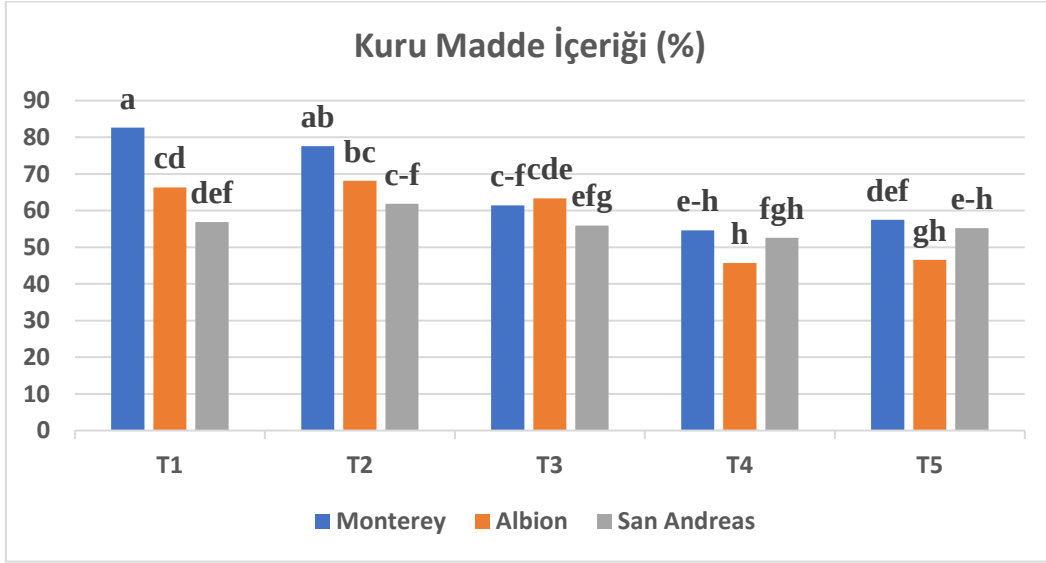
Grafikte yer alan her bir parametre (yaş ağırlık, kuru ağırlık ve kuru bazda nem kendi içerisinde istatistiksel olarak analiz edilmiş ve birbirinden bağımsız olarak harflendirilmiştir. Çizgiler üzerindeki farklı harfler, Tukey testi sonuçlarına göre $p < 0.05$ önem düzeyinde istatistiksel farkı temsil etmektedir. Uygulamalar, **T1**: Güneşte Kurutma, **T2**: Gölgede Kurutma, **T3**: 40 °C etüvde kurutma, **T4**: 50 °C etüvde kurutma, **T5**: 60 °C etüvde kurutma şeklindedir.

Çeşit × kurutma interaksiyon sonuçlarına göre, elde edilen meyvelerin taze ağırlıkları, T4 (Etüv-50) uygulamasının özellikle Albion çeşidinde belirgin bir üstünlük sağladığı görülmektedir. Çizelge 2’de verilen kuru madde içeriklerine göre en yüksek kuru madde içeriğine Monterey × T1 (Güneş) (%82.59) ve Monterey × T2 (Gölge) (%77.57) uygulamalarından elde edilmiştir (Çizelge 2). Monterey çeşidinde farklı kurutma koşulları altında gözlemlenen kuru madde içeriğindeki önemli farklılıklar, çevresel etmenler için uygun

çeşitlerin seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca toprak kalitesinin, nem seviyelerinin ve besin maddesi bulunabilirliğinin de ürünlerdeki kuru madde birikiminde önemli roller oynadığını göstermiştir (Baafi ve ark., 2015). Genotip ve çevre koşulları arasındaki interaksyon, patates çeşitleri üzerinde yapılan araştırmalarda da kuru madde ve nişasta içeriğinde değişikliklere yol açtığı belirlenmiştir (Asmamaw ve ark., 2010; Gościnnia ve ark., 2024). Bu nedenle, Monterey gibi yüksek performanslı çeşitlerin seçimiyle birlikte etkili yönetim stratejilerinin entegre edilmesi kuru madde verimini daha da artırabilmektedir. Dahası, yüksek kuru madde içeriğinin etkileri sadece verimi değil aynı zamanda ürünün kalitesini ve pazarlanabilirliğini de etkilemektedir. Yüksek kuru madde içeriği genellikle daha iyi doku, lezzet ve besin değeri ile ilişkilendirilir ve bu da ürünleri tüketiciler için daha çekici hale getirmektedir (Radzevicius ve ark., 2016). Monterey çeşidinin hem güneş hem de gölge uygulamalarında en yüksek kuru madde içeriğine ulaştığını gösteren sonuçlar, çilek üretiminde genetik, çevresel koşulları karşısında tarımsal uygulamaları optimize etmek ve gıda güvenliğini iyileştirmek ve dolaylı olarak kuru madde içeriği artışında da önemli olacaktır.

Çizelge 2. Çeşit kurutma yöntemi interaksyonunun taze ağırlık (g), kuru ağırlık (g) ve kuru madde üzerindeki nem oranlarına (%) etkisi





Çizgiler üzerindeki farklı harfler, Tukey testi sonuçlarına göre $p < 0.05$ önem düzeyinde istatistiksel farkı temsil etmektedir. Uygulamalar, **T1**: Güneşte Kurutma, **T2**: Gölgede Kurutma, **T3**: 40 °C etüvde kurutma, **T4**: 50 °C etüvde kurutma, **T5**: 60 °C etüvde kurutma şeklindedir.

4.SONUÇ

Sonuç olarak, çileklerin kurutulması, raf ömrünü uzatırken kalite açısından da korunmasını sağlayan etkili bir muhafaza yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ancak kurutma yöntemi ve çeşit seçimi, ürün kalitesini belirlemede kritik bir faktördür. Çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, güneşte ve gölgede kurutma, çilek muhafazasında öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, tüketicilere yüksek kaliteli kurutulmuş çilek sunulabilmesi açısından üreticilere ve araştırmacılara bilgiler sağlamaktadır.

Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmaların, çilek kurutma yöntemlerinin optimizasyonuna ve ürün kalitesinin korunmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesine odaklanması önem arz etmektedir.

Bu kapsamda, farklı sıcaklık ve bağıl nem koşullarında gerçekleştirilen kurutma işlemlerinin çileklerin fiziksel, kimyasal ve besinsel özellikleri üzerindeki etkilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi, gıda endüstrisinde daha verimli ve yüksek kaliteli kurutma uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Böylelikle, tüketici beklentilerini karşılayan, besin değerini büyük ölçüde muhafaza eden ve ticari açıdan uygulanabilir kurutma tekniklerinin geliştirilmesi mümkün olabilecektir.

Ayrıca gelecekte yapılacak araştırmaların, bu çalışmanın bulgularını destekleyici nitelikte olarak farklı çilek çeşitlerinde kuru madde içeriğinin artırılmasına yönelik yetiştirme programlarının potansiyelinin değerlendirilmesine odaklanması da önemli görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmaya desteklerinden dolayı (TÜBİTAK 2209-A) TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abd-Elhady, M. 2014. Effect of citric acid, calcium lactate and low temperature prefreezing treatment on the quality of frozen strawberry. *Annals of Agricultural Sciences*, 59(1), 69-75.
- Akharume, F., Smith, A., Sivanandan, L. ve Singh, K., 2019, Recent progress on osmo-convective dehydration of fruits, *Journal of Food Science & Technology*, 4 (9), 956-969.
- Anderson, K. ve Ponnusamy, S., 2023, Structural transformation away from agriculture in growing open economies, *Agricultural Economics*, 54 (1), 62-76.
- Anees, M., Gao, L., Umer, M. J., Yuan, P., Zhu, H., Lu, X., He, N., Gong, C., Kaseb, M. O. ve Zhao, S., 2021, Identification of key gene networks associated with cell wall components leading to flesh firmness in watermelon, *Frontiers in plant science*, 12, 630243.
- Ansarif, E., & Moradinezhad, F. 2021. Preservation of strawberry fruit quality via the use of active packaging with encapsulated thyme essential oil in zein nanofiber film. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(9), 4239-4247.
- Asmamaw, Y., Tekalign, T. ve Workneh, T. S., 2010, Specific gravity, dry matter concentration, pH, and crisp-making potential of Ethiopian potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars as influenced by growing environment and length of storage under ambient conditions, *Potato Research*, 53, 95-109.
- Ateş, S. ve Türemiş, F., 2015, Nevşehir ili organik çilek yetiştiriciliğinde kullanılabilecek farklı gübre ve malç materyallerinin verim ve kalite özellikleri üzerine etkileri, *Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*.
- Baafi, E., Manu-Aduening, J. A., Carey, E. E., Ofori, K., Blay, E. T., & Gracen, V. E. 2015. Constraints and breeding priorities for increased sweetpotato utilization in Ghana.
- Čabilovski, R., Manojlović, M. S., Popović, B. M., Radojčin, M. T., Magazin, N., Petković, K., Kovačević, D. ve Lakićević, M. D., 2023, Vermicompost and vermicompost leachate application in strawberry production: Impact on yield and fruit quality, *Horticulturae*, 9 (3), 337.
- Cemeroğlu, B. (2007). Gıda analizleri. *Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları*, 34, 168-171.
- Çolak, A., 2023, Determination of Yield and Quality Characteristics of Some Strawberry Varieties in Uşak Ecological Conditions, *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 16 (3), 918-927.
- Diel, M. I., Pinheiro, M. V. M., Cocco, C., Caron, B. O., Fontana, D. C., Meira, D. ve Schmidt, D., 2018, Yield and quality performance of Italian and American strawberry genotypes in Brazil, *Journal of Agricultural Science*, 10 (2), 139-147.
- Domingues, A. R., Vidal, T. C. M., Hata, F. T., Ventura, M. U., Gonçalves, L. S. A. ve Silva, J. B. d., 2018, Postharvest quality, antioxidant activity and acceptability of strawberries grown in conventional and organic systems, *Brazilian Journal of Food Technology*, 21, e2017154.
- Dung, C. D., Wallace, H. M., Bai, S. H., Ogbourne, S. M. ve Trueman, S. J., 2021, Cross-pollination affects fruit colour, acidity, firmness and shelf life of self-compatible strawberry, *Plos one*, 16 (9), e0256964.
- Erdem, S. Ö. ve Çekiç, Ç., 2017 Geçmişten Günümüze Çilek Islahı, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6 (3), 105-115.
- Fan, Z., Plotto, A., Bai, J. ve Whitaker, V. M., 2021, Volatiles influencing sensory attributes and Bayesian modeling of the soluble solids–sweetness relationship in strawberry, *Frontiers in plant science*, 12, 640704.

- Giampieri, F., Tulipani, S., Alvarez-Suarez, J. M., Quiles, J. L., Mezzetti, B. ve Battino, M., 2012, The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health, *Nutrition*, 28 (1), 9-19.
- Gościńska, K., Retmańska, K., Wszelaczyńska, E. ve Pobereźny, J., 2024, Influence of Edible Potato Production Technologies with the Use of Soil Conditioner on the Nutritional Value of Tubers, *Agronomy*, 14 (3), 549.
- Hancock, J. F., & Bringham, R. S. (1988). Yield component interactions in wild populations of California *Fragaria*. *HortScience*, 23(5), 889-891.
- Janurianti, N. M. D., Utama, I. M. S. ve Gunam, I. B. W., 2021, Colour and quality of strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch.) at different levels of maturity, *SEAS (Sustainable Environment Agricultural Science)*, 5 (1), 22-28.
- Kandemir, A., 2016, Bazı çilek çeşitlerinin örtüaltında performanslarının belirlenmesi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun*, 79.
- Kowalska, J., Kowalska, H., Marzec, A., Brzeziński, T., Samborska, K. ve Lenart, A., 2018, Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack, *Food science and biotechnology*, 27, 799-807.
- Mishra, P. K., Ram, R. B. ve Kumar, N., 2015, Genetic variability, heritability, and genetic advance in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.), *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39 (3), 451-458.
- Omolola, A. O., Jideani, A. I. ve Kapila, P. F., 2017, Quality properties of fruits as affected by drying operation, *Critical reviews in food science and nutrition*, 57 (1), 95-108.
- Oğuz, H. İ., Zorlugenç, F. K., Zorlugenç, B., & Kafkas, E. (2017). Nevşehir iklim koşullarında yetiştirilen bazı çilek (*Fragaria x ananassa* L.) çeşitlerinin meyve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Bahçe*, 46(Özel Sayı 1) 5. Uluslararası Üzümsü Meyveler Sempozyumu), 303-310.
- Özdemir, E., K. Gündüz ve M. Şehitoğlu, 2003. Yayladağı (Hatay) Koşullarında Yetiştirilen Bazı Çilek Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Türkiye IV. Ulusal Bahçe Bitkileri Kongresi, Kongresi, 08–12 Eylül 2003, Antalya, 301–308.
- Putri, R. ve Falah, M., 2023, Effects of osmotic dehydration pre-treatment on process and quality of freeze-dried strawberries (*Fragaria x ananassa* var. Mencir), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012030.
- Radzevičius, A., Viskelis, J., Karklehenė, R., JUŠKEVIČIENĖ, D. ve VIŠKELIS, P., 2016, Determination of tomato quality attributes using near infrared spectroscopy and reference analysis, *Zemdirbyste-Agriculture*, 103 (1).
- Schwieterman, M. L., Colquhoun, T. A., Jaworski, E. A., Bartoshuk, L. M., Gilbert, J. L., Tieman, D. M., Odabasi, A. Z., Moskowitz, H. R., Folta, K. M. ve Klee, H. J., 2014, Strawberry flavor: diverse chemical compositions, a seasonal influence, and effects on sensory perception, *Plos one*, 9 (2), e88446.
- Wojdyło, A., Figiel, A. ve Oszmiański, J., 2009, Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits, *Journal of agricultural and food chemistry*, 57 (4), 1337-1343.
- Yağcıoğlu, A., 1999. Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No:536, ISBN: 975-483-400-8, İzmir.
- Türemiş, N. (2003). Yeni bazı çilek çeşitlerinin Kıbrıs koşullarındaki adaptasyonu. *Kktc/Tagep*, 5(3.4).

**PEYNİR ÜRETEN İŞLETMELERDE PEYNİR ALTI SUYUNUN
DEĞERLENDİRİLMESİNE İLİŞKİN YAKLAŞIMLARIN EKONOMİK VE
ÇEVRESEL ANALİZİ: BİR LİTERATÜR İNCELEMESİ**

Ziraat Mühendisi , NADİRE BUCAK

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü

bucaknadire@gmail.com - 0000-0002-5086-1584

Prof.Dr , NEVİN DEMİRBAŞ

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü

nevin.demirbas@ege.edu.tr - 0000-0002-0541-1437

Dr.Öğr.Üyesi , YARKIN AKYÜZ

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü

yarkin.akyuz@ege.edu.tr - 0000-0002-1220-9739

ÖZET

Süt sanayisinin en yaygın ve stratejik yan ürünlerinden biri olan peynir altı suyu (PAS), içerdiği laktoz, çözünür proteinler ve mineraller sayesinde yüksek bir ekonomik ve fonksiyonel değer taşıırken, barındırdığı yüksek biyolojik ve kimyasal oksijen ihtiyacı nedeniyle kontrolsüz bertarafı durumunda toprak ve su kaynakları üzerinde ciddi çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Bu çalışmanın amacı, PAS'ın gıda, tarım ve enerji sektörlerinde değerlendirilmesine yönelik Türkiye'deki mevcut durumu; AB ve ABD'deki kooperatif tabanlı toplama ağları ve kurumsal yönetim modelleri bağlamında karşılaştırmalı olarak incelemektir. Bu doğrultuda 2005-2024 yılları arasındaki literatür, uluslararası akademik veri tabanları üzerinden analitik bir yaklaşımla incelenerek sentezlenmiştir. Elde edilen bulgular; gelişmiş ülkelerde PAS'ın sistematik toplama ağları ve kooperatif tabanlı modellerle yüksek katma değerli ürünlere (protein izolatları, biyogaz vb.) dönüştürüldüğünü, Türkiye'de ise teknik bilgi birikimi ve yüksek üretim potansiyeline rağmen merkezi toplama sistemlerinin yokluğu ve Organize Sanayi Bölgeleri'nin (OSB) geri kazanımdan ziyade bertaraf odaklı altyapısı nedeniyle sürecin parçalı ve düşük katma değerli kaldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, PAS'ın çevresel bir yük olmaktan çıkarılarak katma değer yaratan bir üretim girdisi hâline dönüştürülmesi için bölgesel toplama merkezleri, sektörel kümelenme modelleri ve bunları destekleyen stratejik teşvik mekanizmaları ve bütüncül altyapı araçlarının geliştirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Peynir altı suyu, Peynir altı suyu değerlendirmesi (Whey valorization), Süt sanayi yan ürünleri, Atık yönetimi

1.GİRİŞ

Sürdürülebilir üretim yaklaşımlarının giderek önem kazanması, gıda sanayinde üretim süreçlerinde ortaya çıkan yan ürünlerin değerlendirilmesini önemli bir araştırma alanı haline getirmiştir. Süt ve süt ürünleri sanayii, tarıma dayalı sanayiler arasında üretim hacmi, istihdam kapasitesi ve ekonomik katkısı açısından önemli bir yere sahiptir. Bu sektör üretimi içerisinde peynir üretimi hem Türkiye’de hem de dünya genelinde süt sanayiinin en yaygın ve katma değeri yüksek üretim alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Peynir üretiminin doğal bir çıktısı olan peynir altı suyu ise uzun yıllar boyunca ekonomik potansiyeli yeterince dikkate alınmayan ve çoğunlukla çevresel bir atık olarak değerlendirilen bir yan ürün niteliği taşımıştır (Konar, 1978; Demirci ve Arıcı, 1989). Peynir altı suyu (PAS), peynir veya kazein üretimi sırasında pıhtılaşan kısımdan ayrılan ve sütün yaklaşık %85–90’ını oluşturan yeşil-sarı renkli sıvı bir serumdur. Laktoz, çözünür proteinler ve mineral maddeler bakımından zengin bir bileşime sahiptir (Yüksel ve ark., 2019). Peynir altı suyu (PAS), yüksek laktoz içeriği nedeniyle çok yüksek Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) değerlerine sahip olup önemli bir çevre kirleticisi olarak kabul edilir. Kirlilik yükü oldukça yüksektir; BOİ değeri tipik bir şehir kanalizasyonundan yaklaşık 175 kat fazladır ve 4.000 litre PAS, yaklaşık 1.900 kişinin fekal (evsel atık su) atığına eşdeğer çevresel etki yarattığı kabul edilmektedir (Bolwig et al., 2019; Schaefer ve ark., 2023). PAS su kaynaklarına karıştığında mikroorganizmalar tarafından parçalanırken sudaki oksijeni hızla tüketir ve bu durum ötrofikasyona (su ortamında besin maddesi birikimi) yol açarak sucul canlıların ölmesine neden olabilmektedir. Ayrıca bozunma sürecinde kötü kokular oluştururken, tarım arazilerine kontrolsüz verildiğinde toprakta oksijen tüketimi, tuz birikimi ve ürün kayıplarına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra korozyon (aşındırıcı) yapısı ise altyapı ve su yollarında fiziksel ve kimyasal hasar oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerle PAS’ın arıtılmadan çevreye bırakılması birçok ülkede sıkı çevre mevzuatlarıyla yasaklanmıştır (Papademas and Kotsaki, 2019).

Peynir altı suyu yalnızca çevresel bir risk değil, aynı zamanda gıda, enerji ve biyoteknoloji sektörlerinde değerlendirilebilecek önemli bir endüstriyel hammadde niteliği taşımaktadır. Dünya genelinde sürdürülebilir üretim ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarının stratejik önem kazanmasıyla birlikte, süt sanayiinin en kritik yan ürünü olan peynir altı suyunun (PAS) yönetimi bir "atık bertarafı" meselesinden ziyade "kaynak yönetimi" olarak ele alınmaya başlanmıştır. Avrupa ve ABD örneklerinde PAS yönetimi; kamusal bir atık sistemi yerine kooperatif tabanlı, sözleşmeli ve bölgesel organizasyonlar aracılığıyla stratejik bir ara ürün olarak yönetilmektedir. Bu ülkelerde toplama ve lojistik süreçleri belirli standartlara göre planlanmakta ve PAS, merkezi işleme tesislerine yönlendirilen ekonomik değeri yüksek bir hammadde olarak kabul edilmektedir. Buna karşın Türkiye ölçeğinde bakıldığında, PAS’ın fiili değerlendirme kapasitesine ilişkin düzenli veri setlerinin bulunmaması gelişim sürecinin takibini zorlaştırmaktadır. Yerel ve özel sektör odaklı başarılı lojistik ağları mevcut olsa da bu uygulamalar henüz ülke genelinde kurumsallaşmış bir yapıya kavuşamamıştır. Özellikle Türkiye’deki Organize Sanayi Bölgelerinin (OSB) mevcut altyapısının sadece "atık su arıtımı ve bertarafı" üzerine kurgulanmış olması, PAS’ın ekonomik bir hammadde olarak geri kazanımını yapısal olarak kısıtlamaktadır. Mevcut literatür incelendiğinde ise çalışmaların

büyük oranda teknik süreçlere ve laboratuvar ölçekli yöntemlere odaklandığı; ancak ekonomik sürdürülebilirlik ile kurumsal yönetim modellerini sentezleyen kaynakların sınırlı olduğu görülmektedir. Buna rağmen mevcut literatürde peynir altı suyunun değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların büyük ölçüde teknik süreçler ve laboratuvar ölçekli uygulamalara odaklandığı; ekonomik sürdürülebilirlik ve organizasyonel yönetim modellerini birlikte ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda mevcut literatürdeki teknik odaklı yaklaşımın ötesine geçilerek, peynir altı suyu yönetiminin ekonomik ve çevresel boyutlarının organizasyonel yapılar çerçevesinde değerlendirilmesi önem kazanmaktadır. Bu çalışma, peynir altı suyunun (PAS) yönetimini ekonomik ve çevresel analiz perspektifiyle ele alarak Türkiye’deki mevcut durumun organizasyonel yapı üzerinden değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Araştırma kapsamında Avrupa Birliği ve ABD’de uygulanan Merkezi Toplama, Bölgesel İşleme ve Sektörel Simbiyoz olmak üzere üç temel kooperatif ve kümelenme modelinin Türkiye ölçeğine uyarlanabilirliği karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışma, peynir altı suyunun ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirilmesine yönelik ulusal ve uluslararası literatürün sistematik olarak incelendiği nitel bir araştırma niteliğindedir. Araştırmada 2005–2024 yılları arasında yayımlanan akademik çalışmalar, raporlar ve istatistiksel veri kaynakları incelenmiştir. Literatür taraması Web of Science, Scopus ve Google Scholar veri tabanlarında gerçekleştirilen aramalar yoluyla yapılmıştır. Tarama sürecinde “whey utilization”, “whey valorization”, “dairy by-products”, “whey management”, “circular economy dairy sector” ve “peynir altı suyu değerlendirilmesi” gibi anahtar kelimeler kullanılmıştır. İlk aşamada elde edilen çalışmalar başlık ve özetleri açısından incelenmiş, konu ile doğrudan ilişkili olmayan çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. İkinci aşamada ise tam metin incelemesi yapılarak peynir altı suyunun kullanım alanları, ekonomik potansiyeli ve yönetim modelleri üzerine odaklanan çalışmalar değerlendirmeye dahil edilmiştir. Seçilen literatür; peynir altı suyunun kullanım alanları ve değerlendirme yaklaşımları doğrultusunda gıda sanayii, tarımsal üretim, enerji üretimi, biyoteknoloji uygulamaları ve endüstriyel yönetim modelleri başlıkları altında sınıflandırılmıştır. Bu çalışmaların bulguları karşılaştırmalı bir yaklaşımla analiz edilerek dünya genelindeki uygulamalar ile Türkiye’deki mevcut durum; kurumsal yapı, teknolojik altyapı, ürün çeşitliliği ve mevzuat açısından değerlendirilmiştir. Buna ek olarak Türkiye’deki peynir üretimi ve buna bağlı olarak ortaya çıkan peynir altı suyu potansiyelinin belirlenmesi amacıyla TÜİK, Ulusal Süt Konseyi (USK) ve FAO gibi resmi veri kaynaklarından elde edilen istatistiksel veriler kullanılmıştır. Türkiye’deki peynir üretimi ile tahmini peynir altı suyu miktarı arasındaki ilişki ise literatürde yaygın olarak kabul edilen 1 birim peynir üretimine karşılık yaklaşık 8–9 birim peynir altı suyu oluştuğu varsayımı temel alınarak hesaplanmıştır.

2. Peynir Altı Suyunun Değerlendirilmesi

2.1. Gıda Sanayiinde Kullanımı ve Değerlendirme Potansiyeli

Gıda sanayiinde yüksek kaliteli protein, laktoz ve mineral içeriğiyle stratejik bir hammaddeye dönüşen Peynir Altı Suyu (PAS), çok geniş bir yelpazede fonksiyonel çözümler sunmaktadır. Fırıncılık mamullerinde doku ve lezzeti iyileştirmekle kalmayıp, Maillard reaksiyonu aracılığıyla ideal kabuk renginin oluşmasını sağlayan PAS (Papademas and Kotsaki, 2019); süt

ürünlerinde ise dondurma üretiminde yağsız süt tozuna alternatif teşkil etmekte ve yoğurtlarda pürüzsüz bir kıvam elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Şekerleme sektöründe özellikle karamel tipi ürünlerde arzu edilen taneli yapıyı oluştururken, dondurulmuş tatlılarda etkili bir yağ ikame maddesi olarak görev yapar (Kosikowski, 1979; Schaefer et al., 2023). Besleyici ve özel gıda üretimi kapsamında; PAS protein konsantreleri (WPC) ve izolatları (WPI), anne sütüne yakın profil sağlayan bebek mamalarında, kas onarımı odaklı sporcu gıdalarında ve klinik beslenme ürünlerinde temel bileşen niteliğindedir. İçecek sanayiinde meyve suları ile harmanlanan besleyici içeceklerin üretiminde, et sanayiinde ise sosis ve jambon gibi işlenmiş ürünlerde su tutma kapasitesini artıran bağlayıcı bir dolgu maddesi olarak değerlendirilmektedir. Türkiye’de gıda sanayiinde peynir altı suyunun kullanımı belirli alanlarla sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte, fonksiyonel gıdalara yönelik talebin artması ve sağlıklı beslenme eğilimlerinin güçlenmesi, bu yan ürünün gıda sanayiindeki önemini giderek artırmaktadır. Bu durum, bilgi üretimi ile uygulama arasındaki yapısal kopukluğa işaret etmektedir (Sirmacekic, 2022).

2.2. Bitkisel ve Hayvansal Üretim Faaliyetlerinde Kullanımı

Peynir altı suyu, modern tarımsal üretim süreçlerinde hem hayvansal besleme hem de bitkisel verimlilik odağında değerli bir girdi olarak konumlanmaktadır. Hayvansal üretim disipliniinde sıvı, konsantre veya toz formunda değerlendirilen bu yan ürün; sığır, kanatlı ve domuz yetiştiriciliğinde maliyet etkin bir rasyon bileşenidir. Özellikle tavukçulukta muhteviyatındaki laktöz, belirli patojenlerin baskılanmasında kritik rol üstlenirken; barındırdığı zengin riboflavin civciv gelişimini hızlandırmakta ve kuluçka başarısını artırmaktadır (Webb and Whittier, 1948). Domuz yetiştiriciliğinde ise yüksek enerji muhtevasıyla özellikle yavru besleme aşamasına optimal uyum sağlayan PAS, protein konsantreleri aracılığıyla süt ikame ürünlerinin ana eksenini oluşturmaktadır. Bu bileşenler bağırsak mikrobiyotasını düzenleyici biyolojik açıdan etkili bir bileşen olarak da görülmekte ve işletme bazında yem giderlerinde önemli oranda tasarruf imkânı sağlamaktadır (Kosikowski, 1979). Bitkisel üretim perspektifinde ise PAS hem doğal bir koruyucu hem de toprak kondisyonier olarak işlev görmektedir. Ot silajı uygulamalarında laktik asit içeriğiyle besin kaybını önleyen bu sıvı, aynı zamanda mera ve tarım arazilerinin ıslahında doğrudan toprak uygulaması yöntemiyle sisteme dahil edilebilmektedir. Ancak bu yöntemin, toprakta oksijen tüketimini ekstrem seviyelere çıkararak ürün kayıplarına sebebiyet vermemesi için titizlikle yönetilmesi gerekmektedir (Papademas and Kotsaki, 2019). Modern döngüsel ekonomi yaklaşımlarında ise PAS, biyogaz tesislerinde enerji eldesinde kullanıldıktan sonra geriye kalan fermente atık formuyla toprağa geri kazandırılmakta; böylece çevresel riskler bertaraf edilerek sürdürülebilir bir ekosistem inşa edilmektedir. Bu kullanım alanları, peynir altı suyunun yalnızca bir atık değil, gıda, tarım ve enerji sektörlerinde değerlendirilebilecek çok yönlü bir biyolojik kaynak olduğunu göstermektedir.

3. Peynir Altı Suyunun Değerlendirilmesine İlişkin Literatürün İncelenmesi

Peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik literatür, bu yan ürünün çevresel risklerinden ekonomik ve endüstriyel potansiyeline uzanan çok boyutlu bir çerçevede gelişmiştir. İlk dönem çalışmalarda peynir altı suyu daha çok yüksek biyolojik oksijen ihtiyacı ve kimyasal oksijen

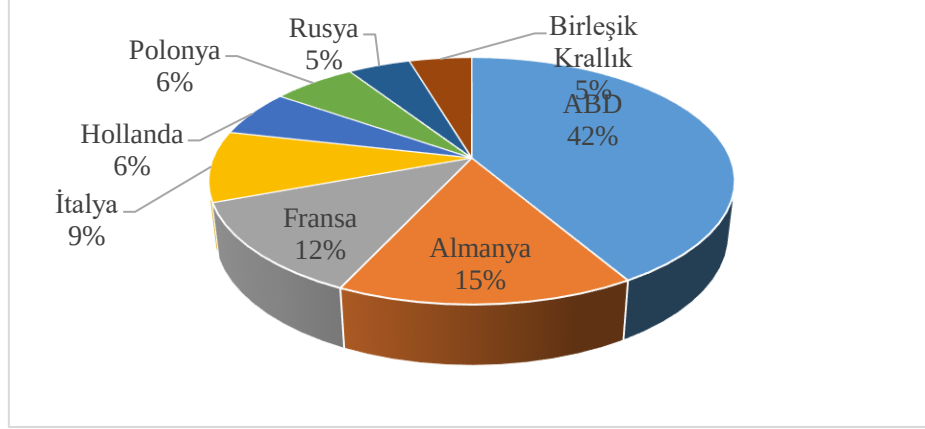
ihtiyacı nedeniyle bertaraf edilmesi gereken bir atık olarak ele alınırken, sonraki araştırmalarda gıda, tarım, hayvancılık ve enerji üretimi gibi alanlarda değerlendirilebilen katma değerli bir yan ürün olduğu ortaya konulmuştur. Bu doğrultuda literatürde, peynir altı suyunun değerlendirilmesine ilişkin yaklaşımlar teknik altyapı, organizasyonel yapı, politika desteği ve çevresel sürdürülebilirlik boyutlarıyla incelenmektedir. (Aydın ve Eker, 2019; Yıldırım ve Çetin, 2020; Şen ve Göktaş, 2022).

3.1. Dünya’da Peynir Altı Suyunun Değerlendirilmesi

Dünya genelinde süt sanayii, peynir altı suyunu (PAS) çevresel bir yükümlülüğten ziyade, yüksek katma değerli bir ekonomik varlık ve stratejik bir hammadde olarak konumlandırmıştır. Özellikle Avrupa Birliği ülkeleri ve ABD’de PAS yönetimi; teknolojik altyapı, yasal düzenlemeler ve güçlü organizasyonel modellerle desteklenen güçlü bir endüstri haline gelmiştir. Küresel ölçekte geliştirilen değerlendirme modelleri incelendiğinde, bu sürecin en başarılı kurumsal stratejisi olarak "Lider Firma" (Lead Firm) modeli öne çıkmaktadır. Bu modelin merkezinde yer alan Danimarka merkezli Arla Foods, PAS işleme faaliyetlerini Arla Foods Ingredients (AFI) adlı uzmanlaşmış ve bağımsız bir birim aracılığıyla yürüterek değer zincirini profesyonel bir organizasyon yapısına kavuşturmuştur (Bolwig et al., 2019)

Söz konusu modelde lider firma; hammadde sağlayan diğer mandıralarla "esir tedarikçi" (captive supplier) ilişkisi kurarak pazar bilgisi ve fiyatlandırma üzerinde tam kontrol sağlarken, yüksek düzeyli Ar-Ge yatırımlarıyla PAS’ı basit bir yan ürün olmaktan çıkarıp bebek mamaları, sporcu gıdaları ve tıbbi beslenme ürünleri için fonksiyonel bileşenlere dönüştürmektedir. Özellikle asit peynir altı suyunun patentli teknolojilerle yeniden işlenebilir hale getirilmesi, bu modelin teknik kapasitesini ve stratejik yatırımlarla sağlanan ölçek ekonomisi avantajını kanıtlamaktadır. Benzer şekilde ABD ve Fransa gibi ülkelerde de küçük ve orta ölçekli üreticilerden çıkan PAS’ın merkezi tesislerde toplanmasına dayanan sistemler uygulanmaktadır (Zall, 1984). Bu yapıda kamu politikaları; yatırım teşvikleri ve fiyat destek mekanizmaları aracılığıyla süreci desteklemekte, membran ayırma teknikleri (ultrafiltrasyon, ters ozmoz) sayesinde PAS; protein konsantreleri (WPC), izolatlar (WPI) ve laktoz türevleri gibi farklı fraksiyonlara ayrıştırılmaktadır. Ayrıca laktoz içeren fazın anaerobik fermentasyon yoluyla biyogaz veya etanole dönüştürülmesi, özellikle Avrupa ve Okyanusya’daki bazı ülkelerde hem enerji geri kazanımı hem de atık yönetimi açısından endüstriyel ölçekte karşılık bulmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde ise süreç daha karmaşık bir görünüm sergilemektedir; örneğin Brezilya’da düzenleyici çerçeve kullanımı teşvik etse de PAS bazlı ürünlerin süt yerine ikame edilmesi gibi besinsel tartışmalar devam etmektedir. Sonuç olarak küresel ölçekte PAS yönetimi, yalnızca bir arıtma meselesi olmaktan çıkmış; teknik kapasitenin, küresel pazarlama ağının ve döngüsel ekonomi stratejilerinin birleştiği bütüncül bir ekonomik yapıya dönüşmüştür.

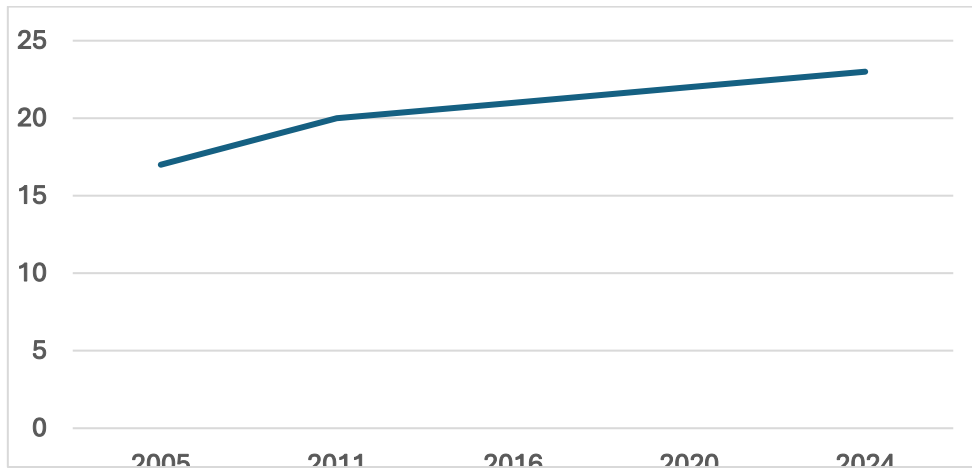
Dünya genelinde peynir üretimi, 2016-2024 yılları arasında istikrarlı bir artış göstererek 2024 yılı itibarıyla 22 milyon tonun üzerinde bir hacme ulaşmıştır. (Görsel 1) veriler analiz edildiğinde; özellikle Avrupa Birliği ve ABD’nin küresel üretimin önemli bir bölümünü oluşturduğu görülmektedir.



Kaynak: FAO (2010-2022)

Görsel 1. Dünya Peynir Altı Suyu Tahmini (%)

Peynir üretimindeki bu büyüme, her 1 kg peynire karşılık açığa çıkan yaklaşık 9 kg'lık yan ürün göz önüne alındığında (Papademas and Kotsaki, 2019), yıllık bazda yaklaşık 200 milyon tonluk büyük bir peynir altı suyu (PAS) arzı yaratmaktadır. Dünya genelinde süt ürünleri piyasasında peynir üretimi ve peynir altı suyu (PAS) türevleri, birbirini besleyen güçlü bir ekonomik ekosistem oluşturmaktadır. Görsel 2 incelendiğinde, 2024 yılı itibarıyla 22 milyon tonu aşan küresel peynir üretiminin beraberinde yıllık yaklaşık 200 milyon tonluk sıvı peynir altı suyu potansiyeli yarattığı görülmektedir. Görsel, dünya genelinde peynir altı suyu üretim potansiyelinin coğrafi dağılımını ve endüstriyel hammadde kapasitesini ortaya koymaktadır. Grafikte açıkça görüldüğü üzere ABD, %38'lik payı ile küresel üretim havuzunun başlıca üretim alanı konumunda yer alarak, bu yan ürünün katma değerli türevlere (WPC, WPI, laktoz) dönüştürülmesinde önemli bir ölçek ekonomisi avantajına sahiptir.



Kaynak: FAO (2005-2024)

Görsel 2. Küresel Ölçekte Peynir Üretimi ve PAS Potansiyeli

Avrupa bloğu ise parçalı bir yapı sergilemesine rağmen, özellikle Almanya (%14,1) ve Fransa (%11,3) liderliğinde, İtalya (%8,4), Hollanda (%5,6) ve Polonya (%5,6) gibi aktörlerle birleştiğinde küresel arzın yarısından fazlasını kontrol eden önemli bir üretim ve işleme alanı oluşturmaktadır. Listenin devamında yer alan Rusya ve Birleşik Krallık (%4,2), bu hiyerarşide tamamlayıcı bir rol oynamaktadır. (FAO 2005-2024). Sonuç olarak bu dağılım, peynir altı suyunun atık yönetiminden ziyade yüksek proteinli içerik ve gıda teknolojileri endüstrisine hammadde sağlayan stratejik bir ekonomik değer zinciri olduğunu ve bu zincirin büyük oranda Kuzey Amerika ile Batı Avrupa ekseninde kümелendiğini göstermektedir. (Bolwig et al., 2019)

3.1.1. Küresel Peynir Altı Suyu (PAS) Yönetim Modelleri

Son yıllarda döngüsel ekonomi yaklaşımının yaygınlaşmasıyla birlikte peynir altı suyuna yönelik bakış açısı önemli ölçüde değişmiştir. Daha önce bertaraf edilmesi gereken bir yan ürün olarak değerlendirilen bu akış, günümüzde yüksek katma değerli bileşenlerin üretilebildiği potansiyel bir endüstriyel kaynak olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda uygulanan ilk model olan Kooperatif Modeli, üretici birliklerinin süt toplama ve peynir üretimini organize ederek, açığa çıkan yan ürünü kooperatife bağlı merkezi işleme ünitelerinde WPC, laktoz veya toz ürünlere dönüştürdüğü bir yapıdır. Özellikle ABD, Danimarka ve Hollanda'da başarıyla uygulanan bu modelde, örneğin ABD'deki süt kooperatifleri 198 süt işleme tesisini yönetmekte ve kurutulmuş whey ürünlerinin yaklaşık %40'ını pazarlamaktadır. (Schaefer et al., 2023)) İkinci bir yaklaşım olan Merkezi (OSB / Endüstriyel Kümelenme) Modeli, OSB altyapılarının sadece "bertaraf" odaklı değil, Ar-Ge ve sanayi entegrasyonu ile "kaynak yönetimi" odaklı yeniden yapılandırılmasını esas alır. İtalya ve Hollanda'da bölgesel kümelenme ve ortak altyapı kullanımı ön plandayken, Çin'de devlet destekli sanayi parkları aracılığıyla yüksek teknolojili ve merkezi bir sistem uygulanmaktadır. Son olarak, Türkiye ve Brezilya gibi ülkelerde yaygın olan Sözleşmeli (Endüstriyel) Toplama Modeli, PAS'ın kantarla ölçülerek kilogram bazlı ödeme ile toplandığı ve atığı stratejik bir ticari emtiaya dönüştüren merkezi bir lojistik yönetim sistemidir. Mevcut durumda Türkiye'deki yapı büyük ölçüde özel sektör ile süt işletmeleri arasında kurulan bu sözleşmeli tedarik yapısına dayanmaktadır. (Yıldırım ve Çetin, 2020).

3.1.2. Dünyadaki Mevcut Destekleme ve Mevzuatlar

Dünya genelinde peynir altı suyu (PAS) yönetimi, çevresel bir atığın stratejik bir endüstriyel hammaddeye dönüştürülmesini hedefleyen "oluktan altına" (*gutter-to-gold*) felsefesiyle şekillenmektedir. Bu dönüşümün yasal öncüsü olan Avrupa Birliği, 1999/31/EC sayılı Atık Depolama Direktifi ile PAS'ın atık sahalarına dökülmesini kesin olarak yasaklayarak sektörü geri kazanıma zorunlu kılmıştır (Papademas and Kotsaki, 2019). Peynir altı suyunun biyolojik oksijen ihtiyacının (BOİ) kentsel atık sulara oranla yaklaşık 175 kat daha fazla olması, bu maddenin arıtılmadan su kaynaklarına deşarj edilmesini sucul ekosistem için ciddi bir ötrofikasyon riski haline getirmekte; bu nedenle kontrolsüz deşarjlar sıkı çevre yasalarıyla engellenmektedir. Söz konusu yasal baskılar, sadece cezai yaptırımlarla sınırlı kalmayıp Ortak Tarım Politikası (CAP) ve çeşitli kırsal kalkınma fonları aracılığıyla inovasyon projelerine sunulan doğrudan finansal teşviklerle desteklenmektedir. Ayrıca, PAS'ın biyogaza dönüştürülmesine yönelik enerji geri kazanım projeleri de döngüsel ekonomi bağlamında özel devlet desteklerine konu olmaktadır (Bolwig et al., 2019). Benzer şekilde ABD ve Fransa gibi

gelişmiş pazarlarda uygulanan kamu politikaları, PAS'ı gıda sanayii için ekonomik değeri yüksek stratejik bir bileşen olarak konumlandırmaktadır. Bu ülkelerde süreç; yatırım teşvikleri ve fiyat destek mekanizmaları üzerinden ölçek ekonomisinin sağlanmasına yönelik makro politikalarla yürütülmektedir (Zall, 1984). Çevresel düzenlemelerin ham peynir altı suyunun doğrudan bertarafını imkansız kılması, işletmeleri ultrafiltrasyon (UF) ve ters ozmoz (RO) gibi membran ayırma tekniklerine ve merkezi işleme modellerine yönlendirmiştir (Kosikowski, 1979; Bolwig et al., 2019). Gelişmekte olan pazarlar arasında yer alan Brezilya ise 2014 yılından itibaren başlattığı özel teknolojik teşvik programları ve 9013/2017 sayılı Kararname ile hayvansal menşeli ürünlerin denetimi kapsamında süreci sıkı bir regülasyon altına almıştır (Schaefer et al., 2023). Bu yasal çerçeve, PAS'ın ürün bileşimindeki kullanımını hem sıhhi hem de endüstriyel açıdan denetleyerek pazar güvenliğini sağlamaktadır.

Küresel eğilimler bir bütün olarak incelendiğinde, PAS'ın kontrolsüz deşarjının yarattığı kirlilik yükü nedeniyle zorunlu arıtma uygulamalarının ve ağır cezai yaptırımların dünya genelinde standartlaştığı görülmektedir (Papademas and Kotsaki, 2019). Gelişmiş pazarlarda bu yan ürünün gıda zincirindeki yerini sağlamlaştırmak adına oluşturulan "makul kimlik standartları" ve şeffaf pazarlama sistemleri hem tüketicinin korunmasını hem de sektörün yasal güvencesini tesis etmiştir (Kosikowski, 1979). Sonuç olarak küresel sistem; çevre mevzuatıyla bertarafı maliyetli hale getirirken, diğer yandan IPARD ve CAP gibi stratejik finansman araçlarıyla yüksek katma değerli üretimi finanse ederek PAS'ı sürdürülebilir bir ekonomik değer zincirine dönüştürmektedir.

3.2. Türkiye’de Peynir Altı Suyunun Değerlendirilmesine İlişkin Mevcut Durum

Türkiye süt ve süt ürünleri sanayinde peynir üretimi stratejik bir paya sahip olmasına rağmen, peynir altı suyunun (PAS) değerlendirilmesine yönelik uygulamalar henüz sistematik bir yapıya kavuşmamıştır. Ancak bu yapısal boşluğun içinde, yerel ölçekte geliştirilen stratejik çözümler umut verici birer istisna oluşturmaktadır. Ezine bölgesinde hayata geçirilen iş birliği modeli, PAS yönetimi için dikkat çekici bir iyi uygulama örneği sunmaktadır. Saha görüşmeleri ve işletme verilerine göre; bölgedeki fabrikalarda depolanan PAS, tankerler aracılığıyla merkezi bir tesise transfer edilmekte ve "kilogram bazlı sözleşmeli ödeme" yöntemiyle satın alınarak ticari bir emtiaya dönüştürülmektedir (Ezine Kaymakamlığı, 2023).

Benzer bir model, Türkiye’nin önemli süt havzalarından biri olan Gönen (Balıkesir) bölgesinde de gözlemlenmektedir. Gönen merkezli büyük ölçekli süt işleme tesisleri, çevre bölgelerdeki mandıralardan topladıkları PAS'ı "sözleşmeli tedarik" yöntemiyle kendi bünyelerindeki ileri işleme tesislerine aktarmaktadır. Burada kurulan toz kurutma ve ultrafiltrasyon üniteleri sayesinde sıvı PAS; protein konsantrelerine (WPC) dönüştürülerek yüksek katma değerli bir endüstriyel hammadde haline getirilmektedir. Bu bölgesel modellere ek olarak Konya havzası, merkezi işleme kapasitesi ve ihracat potansiyeli açısından kritik bir örnek teşkil etmektedir. Bölgedeki yüksek üretim kapasitesine sahip tesisler (örneğin Enka Süt), çevre illerdeki küçük ve orta ölçekli mandıralardan PAS toplayarak bunları toz haline getirmekte ve küresel pazarlara ihraç etmektedir (Konya Sanayi Odası, 2022). Konya örneği, PAS'ın sadece bertaraf edilen bir atık değil, döviz getirisi sağlayan stratejik bir ihracat kalemi haline dönüştürülebileceğini gösteren endüstriyel bir örnek uygulamadır. Ancak bu başarılı yerel örneklerle rağmen, süt ve

süt ürünlerine yönelik İhtisas Organize Sanayi Bölgelerinin (İhtisas OSB) sınırlı olması ve mevcut altyapıların geri kazanımdan ziyade yalnızca atık su deşarj parametrelerine odaklanması, PAS'ın genel atık akışına karışarak değerini yitirmesine yol açmaktadır. Ayrıca, süt toplama merkezlerine benzer bir yapının PAS için tesis edilmemiş olması, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin teknik yetersizlikler ve lojistik maliyetler nedeniyle sürece dahil olmasını zorlaştırmaktadır. Literatürde peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik en önemli yapısal eksikliklerden biri, merkezi ve organize bir toplama sisteminin bulunmaması olarak öne çıkmaktadır. Süt toplama merkezlerine benzer şekilde bölgesel ölçekte çalışan bir peynir altı suyu toplama ve yönlendirme yapısının olmaması, özellikle dağıtık üretim yapısına sahip bölgelerde lojistik maliyetleri artırmakta ve küçük işletmelerin sürece katılımını zorlaştırmaktadır (Aydın ve Eker, 2019). Bu nedenle değerlendirme sorunu yalnızca teknik altyapı meselesi değil, aynı zamanda organizasyonel koordinasyon sorunu olarak da ele alınmalıdır. Bunun yanı sıra, üreticilerin peynir altı suyunu çoğu zaman ekonomik değeri olan bir girdi yerine bertaraf edilmesi gereken bir yan ürün olarak algılaması da değerlendirme eğilimlerini sınırlayan önemli bir unsurdur. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde alternatif kullanım alanlarına ilişkin bilgi düzeyinin sınırlı olması, yenilikçi değerlendirme yöntemlerinin yaygınlaşmasını zorlaştırmaktadır (Yıldırım ve Çetin, 2020). Bu durum, teknik ve ekonomik kısıtların yanı sıra farkındalık ve örgütlenme eksikliğinin de sürecin önünde belirleyici bir engel olduğunu göstermektedir. Son yıllarda PAS'ın kullanımına yönelik akademik çalışmalar artsa da bulgular büyük ölçekli teorik düzeyde kalmakta ve sahaya yeterince yansıtılamamaktadır. (Yıldırım ve Çetin, 2020; Şen ve Göktaş, 2022).

Türkiye'de peynir üretimindeki artış, peynir altı suyu (PAS) miktarında da önemli bir artışı beraberinde getirmektedir. 2023 yılı itibarıyla yaklaşık 716 bin ton peynir üretimine karşılık 6,4 milyon tonun üzerinde PAS potansiyeli olduğu tahmin edilmektedir. Bu durum, PAS'ın yalnızca çevresel bir atık olarak değil, aynı zamanda önemli bir endüstriyel hammadde olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak mevcut kurumsal ve teknolojik altyapı yetersizlikleri nedeniyle Türkiye'de ortaya çıkan bu potansiyelin önemli bir bölümü yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülemede, büyük ölçüde düşük katma değerli kullanım alanlarında veya bertaraf süreçlerinde değerlendirilmektedir. Uluslararası uygulamalar incelendiğinde, özellikle Avrupa Birliği ve ABD'de peynir altı suyunun membran teknolojileri ve ileri işleme yöntemleri aracılığıyla protein konsantreleri, laktoz türevleri ve fonksiyonel gıda bileşenleri gibi yüksek katma değerli ürünlere dönüştürüldüğü görülmektedir. Buna karşın Türkiye'de üretim yapısının parçalı olması, merkezi toplama sistemlerinin sınırlılığı ve küçük ölçekli işletmelerin teknik altyapı eksiklikleri, PAS'ın ekonomik potansiyelinin tam anlamıyla değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum, Türkiye'de peynir altı suyu yönetiminin yalnızca teknik değil aynı zamanda organizasyonel ve kurumsal bir dönüşüm gerektirdiğini göstermektedir.

Çizelge 1'de sunulan veriler incelendiğinde; 2005-2009 döneminde yıllık ortalama 148.298 ton olan peynir üretiminin, 2023 yılı itibarıyla 716.485 tona ulaştığı görülmektedir. (Gülaç, 2015) Peynir üretimindeki bu ivme, proteince zengin bir yan ürün olan peynir altı suyunun (PAS) miktarında da benzer bir artışı beraberinde getirmiştir. Literatürde kabul gören "her bir birim peynir için 8-9 birim PAS oluşumu (Papademas and Kotsaki, 2019) hesaplamasına dayanarak;

2005-2009 ortalamasında 1,3 milyon ton civarında olan tahmini PAS miktarının, 2023 yılında 6,4 milyon tonu aştığı öngörülmektedir. (USK, 2013; USK, 2015) Ham madde potansiyelindeki bu büyük artışa rağmen, bu kaynağın ne kadarının ekonomiye kazandırıldığına dair doğrudan veriler hala kısıtlıdır. (Örmeci Kart ve Demircan, 2014) Türkiye genelinde üretim; sayıları 1,3 milyonu aşan küçük aile işletmelerinden modern bütünleşmiş tesislere kadar geniş bir yelpazede yapılmaktadır.

Geçmişte bertaraf edilmesi gereken bir "atık" olarak görülen PAS, yüksek besin bileşenleri sayesinde gıda sanayii için artık stratejik bir girdi olarak kabul edilmektedir (Demirci ve Arıcı, 1989).

Çizelge 1. Türkiye’de Çiğ Süt, Peynir Üretimi ve Tahmini Peynir Altı Suyu Miktarları (2005–2022)

Yıllar	Çiğ Süt Üretimi	Peynir Üretimi	PAS Potansiyeli
2005*	11.107.897	-	-
2006*	~12.000.000	-	-
2007*	~12.200.000	-	-
2008*	~12.200.000	-	-
2009*	12.542.186	-	-
2010*	13.543.674	437.000	3.933.000
2011*	15.056.211	519.000	4.671.000
2012*	17.401.262	564.000	5.076.000
2013**	18.223.712	600.000	5.400.000
2014**	18.630.860	633.000	5.697.000
2015**	18.654.682	666.000	5.994.000
2016**	18.489.161	661.000	5.949.000
2017**	20.699.894	662.319	5.960.871
2018***	20.803.729	751.214	6.760.926
2019***	21.541.158	711.236	6.401.124
2020***	22.278.584	741.348	6.672.132
2021***	23.016.013	738.744	6.648.696
2022***	23.753.441	715.352	6.438.168

Kaynak: TÜİK* (2005-2013), Ulusal Süt Konseyi** (2013-2018) FAO*** (2018-2022)

Not: Peynir altı suyu miktarı, peynir üretim miktarının yaklaşık 9 katı alınarak hesaplanmıştır (Papademas and Kotsaki, 2019)

Türkiye hayvancılık ekonomisinde peynir altı suyunun (PAS) atıktan katma değerli bir endüstriyel hammaddeye dönüşüm süreci; uluslararası fonlar, ulusal destek programları ve yerel kalkınma dinamikleriyle şekillenmektedir. Sektörel yatırımların en büyük finansal dayanağını, Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti eş finansmanı ile yürütülen IPARD III Programı oluşturmaktadır. Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu (TKDK) IPARD III Uygulama Rehberi uyarınca yönetilen bu fonun "103 nolu Tedbiri" PAS işleme tesislerinin kurulumu ve modernizasyonu için yatırımcıya %50 ile %70 bandında geri ödemesiz hibe

sunarak teknolojik dönüşümü finanse etmektedir. (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018) Birçok modern PAS işleme tesisi, günümüzde AB standartlarındaki bu fonlar aracılığıyla teknolojik altyapısını kurmaktadır. Buna paralel olarak, yerel üretim kapasitesini artırmayı hedefleyen T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, (KKYDP 2026/1 nolu Tebliğ) PAS'tan protein tozu, laktoz ve permeat gibi spesifik bileşenlerin ayrıştırılmasına yönelik projelere %50 oranında hibe sağlamaktadır. Yatırımın finansal sürdürülebilirliği noktasında ise(T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2012/3305 Kanun) KDV istisnası, gümrük vergisi muafiyeti ve vergi indirimi gibi mekanizmalarla yatırımın geri dönüş süresini (ROI) kısaltmaktadır. Yüksek hibe oranlarına rağmen PAS geri kazanımının hala istenilen seviyeye ulaşamadığı görülmüştür. Mevcut yapı, PAS yönetimini bütüncül bir kamusal strateji olmaktan çıkarıp, büyük ölçüde kapasitesi yüksek sınırlı sayıdaki özel sektör işletmesinin inisiyatifine bırakmaktadır. Özellikle İhtisas Organize Sanayi Bölgelerinde (OSB) ortak atık yönetim sistemlerinin ve aktif geri kazanım altyapılarının kurulmamış olması, KOBİ ölçeğindeki işletmeleri bertaraf noktasında çözümsüz bırakmaktadır.

3.3. Dünya ve Türkiye Karşılaştırmalı Değerlendirme

Türkiye ve uluslararası uygulamalar karşılaştırıldığında, peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik yaklaşımların teknik kapasite, organizasyon yapısı, politika desteği ve sektörel farkındalık bakımından belirgin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Uluslararası uygulamalarda peynir altı suyu (PAS), yalnızca bir atık yönetimi meselesi olmaktan çıkarılarak gıda, biyoteknoloji ve enerji sektörlerini besleyen stratejik bir kaynak olarak konumlandırılmıştır. Sütün toplam besin değerinin yaklaşık %55'ini barındıran bu kaynak, döngüsel ekonomi prensipleriyle küresel ölçekte ekonomiye kazandırılmaktadır. (Demirci ve Arıcı, 1989) Ancak Türkiye'de üreticiler, yüksek yatırım maliyetleri ve teknik altyapı eksiklikleri nedeniyle yıllık 6,4 milyon tonu aşan bu potansiyeli hâlâ bertaraf edilmesi gereken bir çevresel yük olarak algılamaktadır (Yıldırım ve Çetin, 2020). Bu algısal ve yapısal bariyer, PAS'ın ekonomik bir değere dönüşmesini engellediği gibi, şehir kanalizasyonundan 175 kat daha fazla kirlilik yüküne (BOİ) sahip olan bu sıvının su ve toprak kaynakları üzerinde baskı oluşturmaya neden olmaktadır (Şen ve Göktaş, 2022). Özellikle Organize Sanayi Bölgelerinin (OSB) altyapısının geri kazanımdan ziyade "bertaraf" odaklı tasarlanmış olması, çevresel riskleri kalıcı hale getiren temel bir unsurdur. Kurumsal açıdan bakıldığında; AB ve ABD'de PAS yönetimi kooperatifler, ortak kullanım tesisleri ve Danimarka merkezli Arla Foods Ingredients (AFI) örneğinde olduğu gibi PAS'ı tıbbi beslenme ve sporcu gıdaları gibi yüksek katma değerli alanlara kanalize eden "Lider Firma" yapıları üzerine kurgulanmıştır. Türkiye'de ise bu tür kolektif modellerin sınırlılığı, özellikle küçük işletmelerin ölçek ekonomisinden faydalanmasını zorlaştırmakta ve süreci kantar bazlı basit bir "sözleşmeli tedarik" yapısına sınırlamaktadır. Bu durum, teknoloji transferinde de kopukluklara yol açmakta; dünyada membran ayırma teknikleri (ultrafiltrasyon, ters ozmoz) standart hale gelmişken, Türkiye'de akademik birikimin sahaya yansıyamaması nedeniyle PAS'ın lor peyniri veya hayvan yemi gibi düşük katma değerli alanlarda kalmasına neden olmaktadır. (Aydın ve Eker, 2019). Ayrıca PAS'ın değerlendirilme stratejileri, sadece ekonomik kâr değil, halk sağlığı perspektifiyle de yönetilmelidir; nitekim PAS bazlı ürünlerin süt yerine ikame edilmesi literatürde besinsel dengesizlik riski olarak tartışılmaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'nin PAS yönetiminde "oluktan

altına" (gutter-to-gold) bir geçiş yapabilmesi; bölgesel toplama merkezlerinin kurulmasına, İhtisas OSB'lerin kaynak odaklı yeniden yapılandırılmasına ve akademik bilginin sanayiye transferini sağlayacak pilot tesislerin hayata geçirilmesine bağlıdır. Sütün içinde saklı kalan bu %55'lik besin potansiyeli, ancak bütünleşik ve sürekli politikalarla gerçek bir ekonomik değere dönüştürülebilir.

Çizelge 2'de Türkiye ile uluslararası uygulamalar arasındaki temel farklılıklar stratejik bakış açısı, teknik altyapı, ürün portföyü ve mevzuat desteği açısından karşılaştırmalı olarak özetlenmektedir. Çizelge incelendiğinde, gelişmiş ülkelerde peynir altı suyunun döngüsel ekonomi çerçevesinde yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülen stratejik bir hammadde olarak ele alındığı, Türkiye'de ise teknik altyapı ve organizasyonel yapıdaki sınırlılıklar nedeniyle bu potansiyelin henüz tam anlamıyla değerlendirilemediği görülmektedir.

Çizelge 2. Türkiye ve Dünya'da Peynir Altı Suyu (PAS) Değerlendirme Yaklaşımlarının Karşılaştırmalı ve Stratejik Analizi

Karşılaştırma Kriteri	Türkiye (Mevcut Sektörel Yapı)	Uluslararası Uygulamalar (AB & ABD)	Temel Akademik Kaynaklar
Stratejik Bakış ve Atık Yönetimi	PAS, yeni yönetmeliklerle bertarafı zorunlu bir atık olmaktan çıkarılarak geri kazanımı yasal çerçevede teşvik edilen stratejik bir hammadde olarak tanımlanmaktadır.	Döngüsel ekonomi prensibiyle, gıda ve ilaç sanayii için ekonomik değeri yüksek stratejik bir hammadde olarak yönetilmektedir.	(Bolwig et al., 2019); Papademas and Kotsaki (2019); ÇŞİDB (2026)
Organizasyonel ve Teknik Altyapı	Merkezi bir toplama sistemi eksiktir; lojistik süreçler parçalıdır ve KOBİ düzeyindeki tesislerde membran teknolojileri (UF, RO) kullanımı sınırlıdır.	Kooperatif tabanlı toplama ağları ve uzmanlaşmış büyük ölçekli işleme merkezlerinde ileri teknoloji kullanımı standarttır.	Kosikowski (1979); Zall (1984); TKDK (2024)
Ürün Portföyü ve Katma Değer	Geleneksel lor üretimi ve sıvı yem rasyonlarının ötesine geçilerek; Yatırım Teşvik Belgeleri (2012) desteğiyle WPC, laktoz ve PAS tozu üretimine yönelik endüstriyel kapasite inşa edilmektedir.	WPC, WPI, laktoz türevleri, farmasötik ürünler ve spesifik tıbbi beslenme bileşenleri gibi geniş bir yelpazede yüksek değerli çıktılar elde edilmektedir.	Webb ve Whittier (1948); Sanayi ve Teknoloji Bak. (2012)(Bolwig et al., 2019)
Mevzuat ve Teşvik Mekanizmaları	IPARD III ile %70'e varan hibeler ve Yeşil Sanayi Destek Programı kredileri mevcuttur. Deşarj kriterleri ile denetimler sıklaştırmıştır.	AB 1999/31/EC gibi direktiflerle geri kazanım zorunlu kılınmış, markalama ve denetim mekanizmaları kurumsallaştırmıştır.	Papademas and Kotsaki (2019); (Schaefer et al., 2023); Tarım ve Orman Bak. (2026)

Genel olarak değerlendirildiğinde, uluslararası uygulamalar peynir altı suyunun etkin biçimde değerlendirilmesinde yalnızca teknik kapasitenin değil, aynı zamanda örgütlenme yapısının, politika sürekliliğinin ve yönlendirici teşvik mekanizmalarının da belirleyici olduğunu göstermektedir. Türkiye'de ise mevcut yüksek üretim potansiyeline rağmen bu alanlarda süregelen yapısal sınırlılıklar, peynir altı suyunun katma değerli ürünlere dönüştürülmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle Türkiye'de peynir altı suyunun daha etkin değerlendirilmesi,

teknik yatırımlar kadar kurumsal koordinasyonun ve uygulamaya dönük politika araçlarının güçlendirilmesine bağlıdır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik uluslararası uygulamalar ile Türkiye’deki mevcut yapı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde, dünya genelinde peynir altı suyu, artık bir bertaraf sorunu olmaktan çıkmış, döngüsel ekonomi prensipleriyle yönetilen stratejik bir hammaddeye dönüşmüştür (USK 2012). Küresel peynir üretiminin 23 milyon tona, buna bağlı PAS oluşumunun ise yıllık 205 milyon tona ulaştığı günümüzde; ABD (%38), Almanya (%14,1) ve Fransa (%11,3) gibi başlıca üretici ülkeler bu kaynağı gıda ve ilaç sanayiinin merkezine yerleştirmiştir. AB ve ABD’de uygulanan kooperatif tabanlı toplama ağları ve uzmanlaşmış büyük ölçekli işleme merkezleri, en küçük işletmenin dahi üretimini sisteme dahil ederek PAS’ın ultrafiltrasyon (UF) ve ters ozmoz (RO) gibi ileri teknolojilerle işlenmesini sağlamaktadır. Bu sayede peynir altı suyu; protein izolatları (WPI), laktoz türevleri ve farmasötik ürünler gibi çok yüksek katma değerli bileşenlere dönüştürülerek ekonomiye yüksek oranda katkı sağlamaktadır. Mevcut literatür incelendiğinde, peynir altı suyunun değerlendirilmesine yönelik çalışmaların büyük ölçüde teknik ve çevresel boyutlara odaklandığı; organizasyonel yapı, politika araçları ve sektör koordinasyonu gibi yönetsel boyutların ise daha sınırlı ele alındığı görülmektedir. Bu durum, peynir altı suyunun değerlendirilmesinde karşılaşılan sorunların yalnızca teknolojik kapasiteyle açıklanamayacağını; aynı zamanda kurumsal yapı, ölçek ekonomisi ve politika yönlendirmesi ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, peynir altı suyunun değerlendirilmesi yüksek bir potansiyel ile yapısal dönüşüm ihtiyacının kesiştiği noktadadır. 2023 yılı verilerine göre Türkiye’de üretilen 716 bin ton peynir, beraberinde 6,4 milyon tonu aşkın bir PAS potansiyeli getirmektedir. Ancak ülkemizde süreç, dünya örneklerinin aksine merkezi bir toplama sisteminden yoksun ve parçalı bir yapıdadır. Mevcut model büyük oranda özel sektör ile işletmeler arasındaki sözleşmeli tedarik yapısına dayanmakta, bu da özellikle KOBİ düzeyindeki tesislerde yüksek lojistik maliyetler ve teknik yetersizlikler nedeniyle değerli bir kaynağın ya geleneksel düşük katma değerli ürünlere (lor üretimi gibi) dönüşmesine ya da yüksek kirlilik yüküyle bertaraf edilmesine yol açmaktadır. Türkiye’de Organize Sanayi Bölgelerinin (OSB) mevcut altyapısının geri kazanımdan ziyade bertaraf odaklı olması, bu ekonomik kaybın temel nedenlerinden biri olarak saptanmıştır.

Bu veriler ışığında Türkiye’nin izlemesi gereken yol haritası; "atıktan kaynağa" paradigmasını merkeze alan bütüncül bir dönüşümü gerekli kılmaktadır. İlk adım olarak, bölgesel toplama merkezleri ve sektörel kümelenme modelleri hayata geçirilerek lojistik verimlilik artırılmalıdır. İhtisas OSB’lerin altyapısı, PAS’ı yüksek teknoloji ürünlerine dönüştürecek ortak kullanım tesislerini barındıracak şekilde yeniden yapılandırılmalıdır. Ayrıca, geleneksel yöntemlerin ötesine geçilerek protein izolatları ve tıbbi beslenme bileşenleri üretimi için Ar-Ge yatırımları ve stratejik teşvik mekanizmaları devreye alınmalıdır. Ulusal bir veri izleme sisteminin kurulması ve akademik bilginin pilot tesisler aracılığıyla sahaya transfer edilmesi, Türkiye’nin bu çevresel yükü küresel ölçekte rekabetçi bir ekonomik güce dönüştürmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, peynir altı suyunun etkin biçimde değerlendirilmesi yalnızca teknik bir işleme süreci değil, aynı zamanda organizasyonel yapı, sektör koordinasyonu ve politika araçlarıyla şekillenen bütüncül bir yönetim meselesidir. Türkiye’de mevcut üretim potansiyelinin ekonomik değere dönüşebilmesi, üretim yoğunluklarına dayalı bölgesel modellerin geliştirilmesi, sanayi–akademi iş birliklerinin güçlendirilmesi ve kaynak yönetimi odaklı politika araçlarının uygulanması ile mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Aydın, G., & Eker, S. (2019). Süt üretiminde yan ürünlerin değerlendirilmesi ve ekonomik katkısı. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 25(2), 45–56.
- Bolwig, S., Brekke, A., Strange, L., & Strøm-Andersen, N. (2019). Valorisation of whey: A tale of two Nordic dairies. In P. Schröder et al. (Eds.), *Circular economy and the transition to a sustainable bioeconomy*. Routledge.
- Demirci, M., & Arıcı, M. (1989). Peynir altı suyunun değerlendirilmesi ve kullanım alanları. *Gıda Dergisi*, 14(3), 145–152.
- Ezine Kaymakamlığı. (2023). Ezine Gıda İhtisas Organize Sanayi Bölgesi çalışmaları, *Ezine bölgesinde peynir altı suyu yönetimi ve iş birliği modeli hakkında açıklama*. Retrieved March 7, 2026, from <https://www.ezine.gov.tr/ezine-gida-ihisas-organize-sanayi-bolgesinde-calismalar-hizla-ilerliyor>
- FAO. (2024). *Agricultural production statistics 2010–2023* (FAOSTAT Analytical Briefs No. 96). Rome.
- Gülaç, Z. N. (2015). *Süt ve süt ürünleri 2015: Durum ve tahmin* (TEPGE Yayın No: 256). Ankara: Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü.
- Konar, A. (1978). Yeni gelişmelerin ışığında sütçülük artıklarının değerlendirilmesi ve ekonomik önemi. *Gıda*, 3(1), 35–46.
- Konya Sanayi Odası. (2022). *Konya havzası PAS işleme kapasitesi ve ihracat potansiyeli raporu*. Konya.
- Kosikowski, F. V. (1979). Whey utilization and whey products. *Journal of Dairy Science*, 62(7), 1149–1160.
- Örmeci Kart, M. Ç., & Demircan, V. (2014). Dünyada ve Türkiye’de süt ve süt ürünleri üretimi, tüketimi ve ticaretindeki gelişmeler. *Akademik Gıda*, 12(1), 78–96.
- Papademas, P., & Kotsaki, P. (2019). Technological utilization of whey towards sustainable exploitation. *Journal of Advances in Dairy Research*, 7(4).
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2012). *2012/3305 sayılı yatırımlarda devlet yardımları hakkında karar ve teşvik belgeleri*. Ankara.

- Schaefer, J., Etges, B. I., & Schaefer, J. L. (2023). A literature database review of the competitive factors that influence the production and use of whey in the Brazilian dairy industry. *Foods*, 12(3).
- Şen, M., & Göktaş, A. (2022). Türkiye’de süt üretiminde atık yönetimi ve yan ürünlerin değerlendirilmesi. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 28(2), 67–80.
- Sirmacekic, E. (2022). Possibilities of using whey wastes in agriculture: Case of Turkey. *Energies*, 15(24), 9636.
- Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu (TKDK). (2024). *IPARD III programı 103 nolu tedbir uygulama rehberi ve PAS tesisleri hibe destekleri*. Ankara.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2018). *Süt sektör politika belgesi 2018–2022*. Ankara: TAGEM.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2026). *KKYDP 2026/1 nolu tebliğ: PAS bileşenlerinin ayrıştırılmasına yönelik hibeler*. Ankara.
- TÜİK. (2024). *Çiğ süt ve süt ürünleri üretim istatistikleri*. Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu.
- Ulusal Süt Konseyi. (2013). *Dünya ve Türkiye’de süt sektör istatistikleri 2012*. Ankara.
- Ulusal Süt Konseyi. (2015). *2015 dünya süt zirvesi raporu*. Vilnius: IDF Ulusal Komitesi.
- Webb, B. H., & Whittier, E. O. (1948). The utilization of whey: A review. *Journal of Dairy Science*, 31(2), 139–164.
- Yıldırım, C., & Çetin, M. (2020). Süt ve süt ürünleri sanayinde atık yönetimi ve çevresel etkiler. *Akademik Gıda*, 18(1), 60–70.
- Yüksel, M., Yüksel, B., & Ürüşan, H. (2019). Peynir altı suyunun değerlendirilmesi ve kullanım alanları. *Gıda Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 27(3), 125–135.
- Zall, R. R. (1984). Trends in whey fractionation and utilization: A global perspective. *Journal of Dairy Science*, 67(9), 2121–2129.

HEMŞİRELİK BAKIMINDA DİJİTAL İKİZ (DİGİTAL TWIN) TEKNOLOJİSİ: BAKIM HATALARINI ÖNLEME VE GELECEK PROJEKSİYONU

Doç. Dr., Aydanur AYDIN

Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Hemşirelik Bölümü
aydanuraydin@gumushane.edu.tr - 0000-0001-5594-404X

ÖZET

Dijital İkiz (Digital Twin) teknolojisi, fiziksel bir varlığın gerçek zamanlı verilerle beslenen sanal bir kopyasını oluşturarak sağlık hizmetlerinde proaktif bir dönemi başlatmaktadır. Hemşirelik disiplini, hastanın bütünsel takibi ve bakım yönetiminden sorumlu olması nedeniyle bu teknolojinin merkezinde yer almaktadır. Bu derleme çalışması, hemşirelik bakımında dijital ikiz uygulamalarının bakım hatalarını önlemedeki rolünü, dünyadaki ve Türkiye’deki güncel örneklerini, mesleki geleceğe etkilerini ve SWOT analizi çerçevesinde sunduğu fırsat ile tehditleri incelemeyi amaçlamaktadır. Literatür taraması sonucunda, dijital ikizlerin özellikle yoğun bakım yönetimi, kişiselleştirilmiş ilaç tedavisi ve cerrahi sonrası izlem süreçlerinde kritik öneme sahip olduğu görülmektedir. Hemşireler, hastaya müdahale etmeden önce dijital model üzerinde simülasyon yaparak ilaç yan etkilerini ve klinik kötüleşmeyi (sepsis vb.) saatler öncesinden öngörebilmektedir. Türkiye’de şehir hastanelerinin dijital altyapısı bu geçiş için bir zemin sunsa da, teknolojinin etik boyutu, veri güvenliği ve hemşirelikte "insani dokunuşun" korunması gibi temel tartışmalar devam etmektedir. Sonuç olarak dijital ikizler, hemşirenin klinik yargı yeteneğini güçlendiren ve otonomisini artıran stratejik bir araçtır. Ancak bu teknolojinin başarılı entegrasyonu için hemşirelik müfredatlarının dijital okuryazarlık ve veri analitiği dersleriyle güncellenmesi, hemşirelerin "algoritmik liderlik" yetkinliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Geleceğin hemşireliği, yapay zekanın sunduğu teknik verilerle mesleğin özü olan empati ve bakım sanatını sentezleyebilen hibrit bir yapıya evrilecektir.

Anahtar Kelimeler: Hemşirelik Bakımı, Dijital İkiz, Bakım Hataları, Sağlıkta Teknoloji, Yapay Zeka, İnovasyon.

DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN NURSING CARE: PREVENTING CARE ERRORS AND FUTURE PROJECTIONS

Assoc. Prof. Dr., Aydanur AYDIN

Gümüşhane University, Health Science Faculty, Department of Nursing
aydanuraydin@gumushane.edu.tr - 0000-0001-5594-404X

ABSTRACT

Digital Twin (DT) technology initiates a proactive era in healthcare by creating a virtual replica of a physical entity powered by real-time data. The nursing discipline stands at the core of this technology due to its primary responsibility for holistic patient monitoring and care management. This review aims to examine the role of digital twin applications in preventing nursing care errors, current examples from global and Turkish perspectives, its impact on the professional future, and the opportunities and threats it presents within the framework of a SWOT analysis. The literature review reveals that digital twins are of critical importance, particularly in intensive care management, personalized pharmacotherapy, and post-operative monitoring processes. Nurses can predict drug side effects and clinical deterioration (e.g., sepsis) hours in advance by performing simulations on the digital model before direct patient intervention. While the digital infrastructure of city hospitals in Türkiye provides a foundation for this transition, fundamental debates regarding the ethical dimensions of technology, data security, and the preservation of the "human touch" in nursing continue. In conclusion, digital twins are strategic tools that strengthen a nurse's clinical judgment and enhance professional autonomy. However, for successful integration, nursing curricula must be updated with digital literacy and data analytics courses, and nurses' "algorithmic leadership" competencies must be developed. The nursing of the future will evolve into a hybrid structure capable of synthesizing technical data provided by artificial intelligence with the essence of the profession: empathy and the art of care.

Keywords: Nursing Care, Digital Twin, Care Errors, Healthcare Technology, Artificial Intelligence, Innovation.

1. HEMŞİRELİK BAKIMINDA DİJİTAL İKİZ KAVRAMI

Dijital İkiz (Digital Twin - DT), fiziksel bir varlığın, sürecin veya sistemin sensör verileriyle beslenen ve gerçek zamanlı olarak güncellenen sanal bir yansımasıdır (Barricelli ve ark., 2019). Sağlık hizmetlerinde "İnsan Dijital İkizi" (Human Digital Twin - HDT), bireyin anatomik, fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerinin dijital bir kopyasını oluşturmayı hedefler. Hemşirelik disiplini, hastanın bütünsel takibi ve bakım yönetiminden sorumlu olduğu için bu teknolojinin birincil kullanıcısı konumundadır. DT, geleneksel izlem yöntemlerinin ötesine geçerek hemşirelere "öngörücü analitik" (predictive analytics) imkanı sunar. Bu, bir hastanın

klirik durumundaki kötüleşmeyi (deterioration) saatler öncesinden fark etmek ve bakım planını buna göre revize etmek anlamına gelir (Armit & Nelson, 2023).

1. 2. Dünyada Kullanılan Örnekler ve Klinik Başarılar

Küresel ölçekte dijital ikiz uygulamaları, özellikle yüksek riskli birimlerde standartları belirlemeye başlamıştır:

- **Sepsis Öngörüsü ve Yoğun Bakım:** Mayo Clinic gibi merkezlerde, YBÜ hastalarının verileri dijital ikiz modellerine aktarılmaktadır. Liu ve ark. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, DT tabanlı karar destek sistemlerinin, hemşirelerin sepsis belirtilerini klinik semptomlar ortaya çıkmadan 6 ila 12 saat önce fark etmelerine olanak tanıdığı ve ölüm oranlarını %15 azalttığı gösterilmiştir.
- **İlaç Yan Etki Simülasyonları:** Linköping Üniversitesi'nde geliştirilen modellerde, hastaların metabolik hızları dijital ikizlerine tanımlanmaktadır. Bu sayede onkoloji hemşireleri, yüksek toksisite riskine sahip kemoterapötiklerin hastanın karaciğer ve böbrek fonksiyonları üzerindeki etkisini önceden gözlemleyebilmektedir (Bruynseels ve ark., 2018).
- **Kişiselleştirilmiş Rehabilitasyon:** Bazı Avrupa hastanelerinde, inme sonrası rehabilitasyon süreçlerinde hastanın kas ve sinir sisteminin dijital ikizi üzerinden en uygun egzersiz programı hemşireler ve fizyoterapistler tarafından simüle edilerek belirlenmektedir.

1. 3. Türkiye Örnekleri ve Yerel Gelişmeler

Türkiye, "Sağlıkta Dijital Dönüşüm" vizyonu ile dijital ikiz teknolojisine geçiş için gerekli olan büyük veri (big data) altyapısını oluşturmaya başlamıştır:

- **Şehir Hastaneleri ve HIMSS Süreçleri:** Türkiye'deki birçok şehir hastanesi, HIMSS Seviye 7 standartlarına ulaşarak "kağıtsız hastane" modeline geçmiştir. Karakuş (2024), bu dijital altyapının DT uygulamaları için gerekli olan kesintisiz veri akışını (interoperability) sağlayan en güçlü temel olduğunu belirtmektedir.
- **Teknopark Girişimleri:** ODTÜ ve İTÜ Teknokent bünyesinde faaliyet gösteren bazı girişimler, diyabetik hastaların glikoz seviyelerini takip eden ve bireysel insülin dozlarını simüle eden "akıllı dijital ikiz" prototipleri üzerinde çalışmaktadır. Bu projeler, diyabet eğitim hemşirelerinin hastaları uzaktan yönetme kapasitesini artırmayı hedeflemektedir.

1. 4. SWOT Analizi

Aşağıdaki tablo, hemşirelikte dijital ikiz teknolojisinin kapsamlı bir stratejik analizini sunmaktadır (Görsel 1):

Güçlü Yönler (S)

- **Bakım Hatalarında Radikal Azalma:** İlaç etkileşimleri ve dozaj hataları fiziksel uygulama öncesi sanal olarak test edilir.
- **Proaktif Bakım:** Reaktif yaklaşımdan, veriye dayalı önleyici yaklaşıma geçiş sağlanır.
- **Bireyselleştirilmiş Bakım:** Standart protokoller yerine hastanın spesifik verilerine odaklanılır.

Zayıf Yönler (W)	• Yüksek Maliyet: Sensörler, bulut bilişim ve AI altyapısı ciddi yatırım gerektirir. • Veri Karmaşıklığı: Çok büyük miktardaki verinin hemşire tarafından yorumlanması için ek eğitim gerekir. • Bağımlılık: Teknolojiye aşırı güven, hemşirelik sezgisinin (clinical intuition) körelmesine neden olabilir.
Fırsatlar (O)	• Tele-Hemşirelikte Devrim: Evde bakım hastalarının hastaneye gelmeden yüksek hassasiyetle izlenmesi. • Hemşirelik Eğitiminde Dönüşüm: Öğrencilerin gerçek hastaya zarar verme riski olmadan karmaşık vakaları simülasyonda yönetmesi. • Sürdürülebilirlik: Gereksiz tahlil ve malzeme kullanımının önüne geçilerek sağlık harcamalarının ve karbon ayak izinin azaltılması.
Tehditler (T)	• Etik ve Mahremiyet: Hastanın tüm biyolojik verilerinin dijital ortamda çalınma riski. • Dehumanizasyon: Hemşirenin hastanın yatağından ziyade ekran başında daha fazla vakit geçirmesi. • Yasal Belirsizlikler: Algoritmanın önerdiği bir bakımın hatayla sonuçlanması durumunda hukuki sorumluluğun kimde olacağı (hemşire mi, yazılımcı mı?).

Görsel 1. Dijital İkiz Uygulamalarının SWOT Analizi

2. 5. GELECEK PERSPEKTİFİ VE GELİŞMELER: HEMŞİRELİKTE PARADİGMA DEĞİŞİMİ

Dijital İkiz (DT) teknolojisi, sağlık hizmetlerinde sadece bir izleme aracı olmanın ötesine geçerek, hemşirelik bakımının ontolojik ve epistemolojik temellerini yeniden tanımlama potansiyeline sahiptir. Gelecek perspektifi; bireysel düzeyden toplumsal düzeye, teknik beceriden etik sorumluluğa kadar geniş bir yelpazede incelenmelidir.

2.1. Bütünsel (Holistik) Dijital İkiz ve Bakım Kuramları

Geleceğin dijital ikiz modelleri, günümüzdeki gibi sadece nabız, tansiyon veya kan şekeri gibi fizyolojik verilerle sınırlı kalmayacaktır. "Bütünsel Dijital İkiz" (Holistic Digital Twin) kavramı, hastanın psikososyal durumunu, uyku kalitesini, beslenme alışkanlıklarını ve hatta çevresel stres faktörlerini (hava kirliliği, gürültü düzeyi vb.) içeren devasa bir veri setini kapsayacaktır. Bu durum, hemşirelikte **Jean Watson'ın İnsan Bakım Kuramı** veya **Martha Rogers'ın Bütüncül İnsan Varlığı Kuramı** gibi teorilerin dijital dünyada karşılık bulmasını sağlayacaktır. Hemşireler, hastanın dijital kopyası üzerinden sadece "iyileşme" sürecini değil, "esenlik" (well-being) halini de simüle edebileceklerdir (Armit & Nelson, 2023).

2.2. Hizmet Olarak Dijital İkiz (DTaaS) ve Sağlıkta Eşitlik

2030'lu yıllarda "Digital Twin as a Service" (DTaaS) modelinin yaygınlaşması öngörülmektedir. Bu gelişme, özellikle kırsal bölgelerde veya gelişmekte olan ülkelerde görev

yapan hemşireler için devrim niteliğindedir. Bulut bilişim sayesinde, dünyanın en gelişmiş yapay zeka algoritmaları ve klinik karar destek sistemleri, bir tablet veya akıllı telefon aracılığıyla sahadaki hemşirenin erişimine sunulacaktır. Bu, uzman bakımının demokratikleşmesi anlamına gelir; örneğin, ücra bir köydeki bir evde bakım hemşiresi, karmaşık bir yara bakım sürecini dijital ikiz üzerinden simüle ederek merkezdeki bir uzman görüşüne ihtiyaç duymadan en doğru müdahaleyi gerçekleştirebilecektir (Pang ve ark., 2022).

2.3. Farmakogenomik Entegrasyonu ve "Sıfır Hatalı" İlaç Yönetimi

Gelecekte hemşirelerin en büyük yardımcısı, hastanın genetik profilini içeren dijital ikizler olacaktır. Mevcut sistemde "doğru hasta, doğru ilaç, doğru doz, doğru zaman ve doğru yol" olan beş doğru ilkesi, DT sayesinde "doğru simülasyon" ile desteklenecektir. Hemşire, ilacı hastaya vermeden önce hastanın genetik kopyası üzerinde ilacın metabolize edilme hızını görebilecek, potansiyel alerjik reaksiyonları veya anafilaksi riskini %100'e yakın bir doğrulukla öngörebilecektir. Bu, hemşirelik hatasına bağlı mortalite ve morbidite oranlarını tarihin en düşük seviyelerine indirebilir.

2.4. Etik ve Yasal Sorumluluk Çerçevesi

Teknolojik gelişmelerle birlikte, "dijital ikiz verisi kimin mülkiyetindedir?" sorusu gündeme gelecektir. Gelecekte hemşireler, sadece bakım veren değil, aynı zamanda "**Veri Savunucusu**" (**Data Advocate**) rolünü de üstleneceklerdir. Hastanın dijital ikizinin siber saldırılardan korunması, verilerin sigorta şirketleri tarafından hastanın aleyhine kullanılmasının engellenmesi gibi konularda hemşirelerin etik liderliği kritik önem kazanacaktır. Ayrıca, bir algoritmanın yanlış yönlendirmesi sonucu yapılan bir hemşirelik hatasında hukuki sorumluluğun nasıl paylaştırılacağına dair uluslararası protokollerin oluşturulması beklenmektedir (Bruynseels ve ark., 2018). Smith ve Rogers (2024), dijital ikiz verilerinin mahremiyetinin korunmasında hemşirelerin birer 'veri savunucusu' (data advocate) olarak konumlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

3. TEKNOLOJİ İLE İNSANİ DOKUNUŞUN SENTEZİ

Hemşirelikte dijital ikiz uygulamaları üzerine yapılan bu inceleme, mesleğin geleceğinin "yüksek teknoloji" (high-tech) ile "yüksek dokunuş" (high-touch) arasında kurulacak hassas dengede yattığını göstermektedir.

3.1. Mesleki Otonominin Güçlenmesi

Dijital ikizler, hemşireyi veriye dayalı konuşan bir "karar verici" konumuna yükseltmektedir. Eskiden hekimin tanı koymasını bekleyen hemşirelik rolü, artık DT verilerini analiz ederek potansiyel riskleri önceden raporlayan ve disiplinlerarası ekip içerisinde stratejik bir ortak olan bir role dönüşmektedir. Bu durum, hemşirelik mesleğinin profesyonelleşme sürecine ivme kazandıracak ve mesleki otonomiye güçlendirecektir (Liu ve ark., 2023).

3.2. Eğitimde Simülasyonun Ötesi

Gelişmeler göstermektedir ki, klasik simülasyon laboratuvarları yerini dijital ikiz entegrasyonlu hibrit ortamlara bırakmaktadır. Öğrenciler, artık sadece plastik maketler üzerinde değil, gerçek hastaların verilerinden türetilmiş ve tepki veren dijital modeller üzerinde eğitim almaktadır. Bu eğitim modeli, öğrencinin klinik yargı yeteneğini güvenli bir ortamda en üst düzeye çıkarmakta ve mezuniyet sonrası "klinik şok" dönemini kısaltmaktadır. Abbott ve Shaw (2024), dijital ikizlerin hemşirelik eğitiminde kullanılmasının, öğrencilerin kritik düşünme becerilerini klasik simülasyonlara göre %40 daha fazla artırdığını belirtmektedir.

3.3. Dehumanizasyon Riski ve Hemşirelik Sezgisi

Her ne kadar dijital ikizler muazzam bir veri sunsa da, teknolojinin "dehumanizasyon" (insanlıktan uzaklaşma) riski göz ardı edilmemelidir. Hemşirelik, sadece biyolojik verilerin yönetimi değil, aynı zamanda bir acının paylaşılması ve şifa sürecinin manevi desteğidir. Sonuçlar göstermektedir ki, dijital ikizler hemşirenin zamanını rutin ölçümlerden kurtararak, hastasıyla daha nitelikli vakit geçirmesine ve "terapötik dokunuş"a daha fazla alan açmasına imkan tanınmalıdır. Algoritmaların asla sahip olamayacağı "hemşirelik sezgisi" ve "etik muhakeme", dijital çağda mesleğin en değerli sermayesi kalmaya devam edecektir (Pang ve ark., 2022). Birkel ve Müller (2025), dijital ikizlerin hastane içi malzeme israfını önleyerek sağlık sistemlerinin karbon ayak izini azaltmada kilit rol oynayacağını savunmaktadır.

4. HEMŞİRELİKTE DİJİTAL OKURYAZARLIK VE ALGORİTMİK LİDERLİK: YENİ MÜFREDAT İHTİYACI

Dijital ikiz teknolojisinin klinik ortama entegrasyonu, sadece teknik bir altyapı sorunu değil, aynı zamanda insan kaynağının bu dönüşüme hazır olma sorunudur. Mevcut hemşirelik müfredatları büyük ölçüde fiziksel bakım becerilerine ve temel tıp bilimlerine odaklanırken, dijital çağın gerektirdiği "algoritmik okuryazarlık" (algorithmic literacy) konusunu henüz tam olarak kapsamamaktadır (Abbott & Shaw, 2024).

4.1. Veri Tercümanı Olarak Hemşire

Dijital ikizler, bir hemşirenin ekranına saniyede binlerce veri noktası taşıyabilir. Ancak bu verilerin hangisinin kritik bir alarm, hangisinin ise sistem kaynaklı bir gürültü (noise) olduğunu ayırt etmek yeni bir uzmanlık alanı gerektirir. Hemşireler, dijital ikizlerin sunduğu tahminleri yorumlayabilen ve bu tahminleri hastanın yatağı başındaki fiziksel gözlemiyle sentezleyebilen birer "veri tercümanı" haline gelmelidir. Turgut ve Yılmaz (2025), geleceğin hemşiresinin

sadece tansiyon ölçmeyi değil, yapay zekanın sunduğu risk skorlarındaki sapmaları analiz etmeyi de bilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

4.2. Algoritmik Liderlik ve Karar Verme

Algoritmik liderlik, hemşirelerin yapay zeka tarafından üretilen bakım önerilerini körü körüne kabul etmek yerine, bu önerileri klinik etik ve profesyonel yargı süzgecinden geçirme yeteneğidir. Eğer bir dijital ikiz modeli, veri setindeki bir önyargı nedeniyle belirli bir hasta grubu için yanlış bir risk değerlendirmesi yapıyorsa, bunu fark edecek ve müdahale edecek olan kişi hemşiredir. Bu nedenle, hemşirelik eğitimine "Yapay Zeka Etiği", "Veri Analitiği" ve "Siber-Güvenli Bakım" gibi derslerin acilen entegre edilmesi bir seçenek değil, zorunluluktur (Smith & Rogers, 2024).

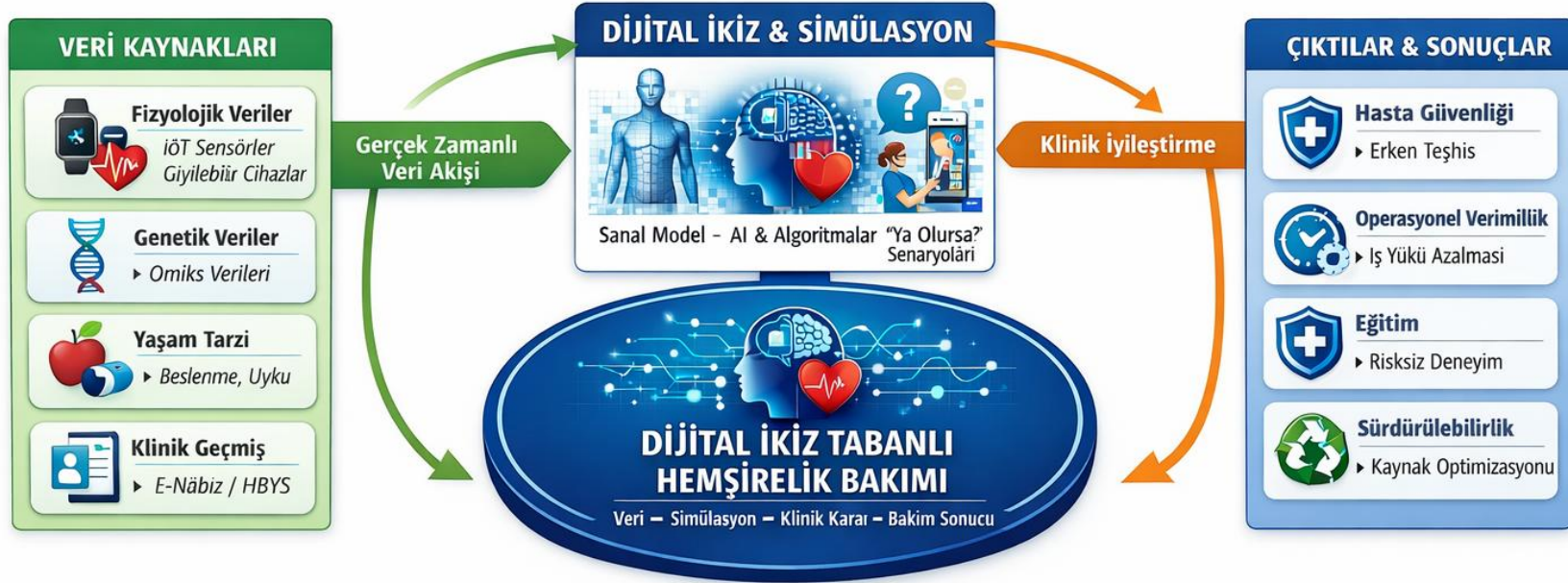
5. Genel Değerlendirme

Sonuç olarak; hemşirelikte dijital ikiz teknolojisi, bakım hatalarını önlemede bir lüks değil, geleceğin sağlık sistemleri için bir zorunluluktur. Türkiye'nin bu teknolojik yarışta yer alabilmesi için:

1. Hemşirelik müfredatına "Sağlık İformatiği" ve "Veri Analitiği" derslerinin entegre edilmesi,
2. Hastane bilgi yönetim sistemlerinin (HBYS) dijital ikiz mimarisine uygun şekilde standardize edilmesi,
3. Hemşirelik araştırmalarının bu alandaki klinik sonuçlara odaklanan projelerle desteklenmesi gerekmektedir.

Dijital İkiz teknolojisi, hemşireliği "deneme-yanılma" döneminden kurtarıp "simüle et-uygula" dönemine taşıyan, mesleğin 21. yüzyıldaki en büyük sıçrama tahtasıdır. Bu teknoloji, bakım hatalarını minimize ederek hasta güvenliğini zirveye taşırken, hemşirenin üzerindeki idari ve rutin yükü azaltarak mesleğin özü olan "insani dokunuş" ve "bakım sanatı" için daha fazla zaman yaratmaktadır.

Sonuç olarak; Türkiye'deki hemşirelik camiasının, dijital ikizleri mesleği tehdit eden bir otomasyon süreci olarak değil, mesleki otonomiye ve bilimsel derinliği artıran bir güç çarpanı olarak görmesi gerekmektedir. Teknoloji ne kadar gelişirse gelişsin, dijital ikizlerin sunduğu soğuk veriyi, şefkatli ve profesyonel bir bakıma dönüştürecek olan tek güç, hemşirenin klinik zekası ve insan sevgisidir. Dijital ikizler, hemşirenin yerini alan bir rakip değil, onun klinik keskinliğini artıran dijital bir yol arkadaşıdır. Bu teknolojinin etik, güvenli ve insan odaklı kullanımı, 21. yüzyıl hemşireliğinin başarısını belirleyecek temel faktör olacaktır. Görsel 2 Hemşirelik bakım sistemine entegre edilmiş dijital ikiz ekosisteminin kavram haritasını göstermektedir.



Görsel 2: Hemşirelik Bakım Süreçlerine Entegre Edilmiş Dijital İkiz Ekosistemi. Bu model, veri toplama, simülasyon ve klinik karar verme arasındaki döngüsel ilişkiyi temsil etmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Abbott, M. B., & Shaw, P. (2024). Virtual patient modeling: The next frontier in nursing education. *Health Informatics Journal*, 30(1), 112-125.
- [2] Armit, L., & Nelson, K. (2023). Digital twins in healthcare: A review of nursing implications. *Journal of Nursing Management*, 31(2), 445-452. <https://doi.org/10.1111/jonm.13890>
- [3] Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design a blueprint. *IEEE Access*, 7, 167653-167671.
- [4] Birkel, H. S., & Müller, J. M. (2025). Potentials of digital twins for sustainable healthcare systems: A nursing perspective. *International Journal of Medical Informatics*, 182, 105-119.
- [5] Bruynseels, K., Santoni de Sio, F., & van den Hoven, J. (2018). Digital twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. *Frontiers in Genetics*, 9, 31. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031>
- [6] Karakuş, M. (2024). Sağlıkta dijital dönüşüm ve dijital ikiz uygulamaları: Türkiye perspektifi. *Sağlık Teknolojileri ve Yönetimi Dergisi*, 12(1), 88-102.
- [7] Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., & Ren, L. (2023). A novel nursing decision support system based on digital twin technology. *International Journal of Nursing Studies*, 138, 104412.
- [8] Pang, C. X., et al. (2022). Digital twins in personalized nursing care: Challenges and opportunities. *Nursing Outlook*, 70(6), 795-804. <https://doi.org/10.1016/j.outlook.2022.06.008>
- [9] Smith, J. A., & Rogers, M. (2024). The role of the nurse as a data advocate in the age of digital twins. *Nursing Ethics Quarterly*, 15(3), 210-224.
- [10] Turgut, S., & Yılmaz, E. (2025). Hemşirelikte yapay zeka ve dijital ikizler: Klinik uygulama rehberi. Ankara: Sağlık Yayınları.
- [11] World Health Organization (WHO). (2024). Global strategy on digital health 2020-2025: Progress report and future projections. Geneva: WHO Press.

ALGORİTMİK ÖNYARGI VE ETİK: HEMŞİRELİKTE YAPAY ZEKANIN GÖRÜNMEYEN RİSKLERİ VE HASTA GÜVENLİĞİ

Doç. Dr., Aydanur AYDIN

Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Hemşirelik Bölümü
aydanuraydin@gumushane.edu.tr - 0000-0001-5594-404X

ÖZET

Yapay zekâ (YZ) tabanlı klinik karar destek sistemleri, hemşirelik bakım planlarının kişiselleştirilmesi, hasta güvenliğinin artırılması ve klinik süreçlerin optimize edilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin kullanımı algoritmik önyargı ve etik sorunları da beraberinde getirmektedir. Algoritmik önyargı, YZ sistemlerinin eğitildiği verilerdeki temsiliyet sorunları, tarihsel eşitsizlikler ve model tasarımına bağlı olarak belirli hasta grupları için sistematik hatalar üretmesi şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, hemşirelik bakımının temel etik ilkeleri olan adalet, yararlılık, zarar vermeme ve hasta özerkliği açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu derleme çalışması, hemşirelik bakım planlarında yapay zekâ kullanımının etik boyutunu “dün–bugün–yarın” perspektifiyle ele alarak, algoritmik önyargının tarihsel arka planını, güncel klinik uygulamalardaki yansımalarını ve geleceğe yönelik yönetim gereksinimlerini tartışmaktadır. Bulgular, hemşirelerin algoritmik çıktıları eleştirel klinik yargı süzgecinden geçirmesinin hasta güvenliği açısından kritik olduğunu göstermektedir. Ayrıca, algoritmik okuryazarlığın hemşirelik eğitime entegre edilmesi ve sağlık kurumlarında çok disiplinli etik denetim mekanizmalarının kurulması gerektiği vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, yapay zekâ destekli bakım uygulamalarının etik açıdan güvenli ve adil biçimde hayata geçirilebilmesi, teknolojik yeniliklerle birlikte insan merkezli ve şeffaf yönetim yaklaşımlarının benimsenmesine bağlıdır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, algoritmik önyargı, hemşirelik bakımı, klinik karar destek sistemleri, etik yönetim, dijital sağlık.

ALGORITHMIC BIAS AND ETHICS: THE HIDDEN RISKS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NURSING AND PATIENT SAFETY

Assoc. Prof. Dr., Aydanur AYDIN

Gümüşhane University, Health Science Faculty, Department of Nursing
aydanuraydin@gumushane.edu.tr - 0000-0001-5594-404X

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI)-based clinical decision support systems offer significant opportunities to personalize nursing care plans, enhance patient safety, and optimize clinical workflows. However, the integration of these technologies also raises critical ethical concerns, particularly regarding algorithmic bias. Algorithmic bias may emerge from representational limitations and historical inequalities embedded in training data, as well as from model design choices, leading to systematic errors for certain patient groups. Such biases pose substantial risks to the core ethical principles of nursing care, including justice, beneficence, non-maleficence, and respect for patient autonomy. This review examines the ethical dimensions of AI use in nursing care planning through a “yesterday–today–tomorrow” perspective, discussing the historical background of bias in clinical decision-making, its current manifestations in AI-supported practices, and future governance requirements. The findings highlight the critical role of nurses in critically appraising algorithmic outputs through professional clinical judgment to ensure patient safety. Furthermore, the integration of algorithmic literacy into nursing education and the establishment of multidisciplinary ethical oversight mechanisms within healthcare institutions are emphasized as key strategies for mitigating ethical risks. In conclusion, the ethical and equitable implementation of AI-supported nursing care depends not only on technological advancement but also on the adoption of human-centered, transparent, and accountable governance frameworks.

Keywords: Artificial intelligence, algorithmic bias, nursing care, clinical decision support systems, ethical governance, digital health.

1. GİRİŞ

Yapay zekâ (YZ) temelli sistemler, sağlık hizmetlerinde klinik karar destek, hasta izlem, risk tahmini ve bakım planlaması gibi pek çok alanda giderek daha yaygın biçimde kullanılmaktadır. Hemşirelik bakımında YZ destekli algoritmalar; hasta güvenliğini artırma, iş yükünü azaltma ve kişiselleştirilmiş bakım sunma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu teknolojilerin yaygınlaşması,

beraberinde algoritmik önyargı (algorithmic bias), etik sorumluluk, adalet, şeffaflık ve hesap verebilirlik gibi ciddi tartışmaları da gündeme getirmiştir.

Algoritmik önyargı, YZ sistemlerinin eğitildiği verilerden, tasarım tercihlerinden veya uygulama bağlamından kaynaklanan sistematik hatalar sonucu bazı hasta gruplarına karşı ayrımcı veya adaletsiz sonuçlar üretmesi anlamına gelir. Hemşirelik bakım planları gibi doğrudan insan yaşamını etkileyen süreçlerde bu tür önyargılar, bakım kalitesinde eşitsizliklere, yanlış klinik yönlendirmelere ve hasta güvenliğinde risklere yol açabilir. Bu nedenle YZ'nin hemşirelikte kullanımı yalnızca teknik bir yenilik olarak değil, aynı zamanda etik yönetim ve denetim mekanizmaları gerektiren sosyo-teknik bir dönüşüm olarak ele alınmalıdır.

Bu derlemenin amacı, algoritmik önyargının kaynaklarını, hemşirelik bakım planlarında YZ kullanımının etik boyutlarını, denetim mekanizmalarını ve geleceğe yönelik politika önerilerini kapsamlı biçimde tartışmaktır.

2. DÜN: ALGORİTMİK KARAR DESTEK ÖNCESİ HEMŞİRELİK BAKIMINDA ETİK VE ÖNYARGI

Yapay zekâ öncesi dönemde hemşirelik bakım planları büyük ölçüde klinik deneyim, kanıta dayalı rehberler ve bireysel hasta değerlendirmeleri temelinde oluşturulmaktaydı. Bu dönemde bakım kararlarında önyargı riski tamamen ortadan kalkmış değildi; aksine, insani önyargılar (bilişsel yanlılıklar, stereotipleştirme, zaman baskısı altında sezgisel kararlar) klinik uygulamaları etkileyebilmekteydi.

Ancak bu önyargılar çoğunlukla bireysel ve bağlamsal düzeyde kalmakta, sistematik olarak çoğaltılan ve ölçeklenen algoritmik yapılara dönüşmemekteydi. Hemşirelerin klinik yargısı, hasta ile kurulan yüz yüze iletişim ve bakımın bütüncül değerlendirilmesi etik açıdan daha görünür ve denetlenebilir bir çerçeve sunmaktaydı.

Bu dönemde etik sorunlar daha çok:

- Hasta mahremiyetinin korunması,
- Bilgilendirilmiş onam,
- Bakımda eşitlik
- Adalet ekseninde tartışılmakta; teknoloji kaynaklı etik riskler sınırlı kalmaktaydı. Dolayısıyla “dün”ün hemşirelik pratiğinde etik riskler vardı; ancak bu riskler bugünkü gibi otomatikleşmiş, görünmez ve ölçeklenebilir algoritmik mekanizmalarla ilişkili değildi.

3. BUGÜN: YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ HEMŞİRELİK BAKIMINDA ALGORİTMİK ÖNYARGI VE ETİK GERİLİMLER

Günümüzde hemşirelik bakım planları; klinik karar destek sistemleri, risk skorları, erken uyarı algoritmaları ve hasta önceliklendirme modelleri aracılığıyla giderek daha fazla yapay zekâ tarafından yönlendirilmektedir. Bu durum, bakım süreçlerinde önemli kazanımlar sağlarken, aynı zamanda yeni etik gerilim alanları yaratmaktadır. Bugünkü tabloda üç temel sorun öne çıkmaktadır:

3.1. Görünmez Önyargıların Klinik Kararlara Sızması

YZ sistemleri, eğitim verilerindeki tarihsel eşitsizlikleri ve temsil sorunlarını yansıtarak, bazı hasta grupları için daha düşük doğrulukta sonuçlar üretebilmektedir. Bu önyargılar, hemşireler tarafından fark edilmediğinde bakım planlarına doğrudan yansıyabilmektedir.

3.2. Otomasyon Yanlılığı ve Klinik Yargının Geri Plana Düşmesi

Algoritmaların “bilimsel ve nesnel” olduğu algısı, hemşirelerin kendi klinik yargılarını ikinci plana atmalarına neden olabilmektedir. Bu durum, hemşirelik mesleğinin özünde bulunan bütüncül değerlendirme ve insani sezgi boyutunu zayıflatma riski taşır.

3.3. Etik Yönetişim Eksikliği

Birçok sağlık kuruluşunda yapay zekâ sistemleri için net etik rehberler, denetim mekanizmaları ve sorumluluk çerçeveleri henüz yeterince kurumsallaşmamıştır. Bu boşluk, algoritmik hataların veya önyargıların fark edilmeden sürdürülmesine yol açabilmektedir.

Bugünün hemşirelik pratiğinde yapay zekâ, ne tamamen reddedilmesi gereken bir tehdit ne de sorgulanmadan benimsenmesi gereken bir kurtarıcıdır. Aksine, etik denetim mekanizmaları ile birlikte yönetilmesi gereken güçlü bir araçtır.

4. YARIN: ETİK YÖNETİŞİMLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YAPAY ZEKÂ VE HEMŞİRELİĞİN GELECEĞİ

Gelecekte hemşirelik bakımında yapay zekâ kullanımının daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir. “Yarın”ın vizyonu, algoritmik önyargının minimize edildiği, etik yönetişimin kurumsallaştığı ve hemşirelerin teknolojinin pasif kullanıcıları değil, etik tasarımın aktif paydaşları olduğu bir ekosistemi ifade etmektedir.

Bu çerçevede beklenen dönüşümler şunlardır:

4.1. Etik-İçkin (Ethics-by-Design) Yapay Zekâ Sistemleri

Geleceğin YZ sistemleri, yalnızca teknik performans değil, adalet, şeffaflık ve hesap verebilirlik kriterleri gözetilerek tasarlanacaktır. Algoritmik önyargı testleri, sistemlerin geliştirme aşamasında standart bir adım haline gelecektir.

4.2. Hemşirelerin Algoritmik Yönetişimde Aktif Rol Alması

Hemşireler, bakım planlarında kullanılan YZ sistemlerinin tasarım, değerlendirme ve güncellenme süreçlerine dahil edilecektir. Böylece teknolojinin klinik gerçeklikle uyumu güçlenecek ve mesleki etik değerler daha doğrudan yansıtılacaktır.

4.3. Hasta Merkezli ve Şeffaf Yapay Zekâ Kullanımı

Hastalar ve hasta yakınları, bakım planlarında yapay zekâ kullanımına ilişkin bilgilendirilecek; algoritmik kararların mantığı anlaşılır biçimde açıklanacaktır. Bu yaklaşım, güven ilişkisini güçlendirecek ve hasta haklarını koruyacaktır.

“Yarın”ın hemşireliği, teknolojiyi etik pusula ile yöneten; insan merkezli, adil ve hesap verebilir bir bakım modeli üzerine inşa edilecektir.

5. ALGORİTMİK ÖNYARGI KAVRAMI VE KAYNAKLARI

Algoritmik önyargı, bir YZ sisteminin belirli gruplar için sistematik olarak hatalı veya dezavantajlı çıktılar üretmesi durumudur. Sağlık bağlamında bu önyargılar; cinsiyet, yaş,

sosyoekonomik durum, coğrafi konum veya etnik köken gibi değişkenler üzerinden ortaya çıkabilmektedir.

5.1. Veri Kaynaklı Önyargılar

YZ modelleri büyük ölçüde geçmiş hasta verileriyle eğitilir.

Eğer bu veriler:

- Belirli grupları yeterince temsil etmiyorsa,
- Eksik veya hatalı kayıtlar içeriyorsa,
- Tarihsel eşitsizlikleri yansıtıyorsa,
- Algoritma da bu önyargıları yeniden üretir. Örneğin, düşük gelirli veya kırsal bölgelerde yaşayan bireylerin sağlık verilerinin eksik olması, YZ'nin bu gruplar için daha az doğru tahminler yapmasına yol açabilir. Hemşirelik bakım planlarında bu durum, risk değerlendirmelerinin yanlış yapılmasına neden olabilir.

5.2. Model ve Tasarım Kaynaklı Önyargılar

Algoritmaların hangi değişkenleri dikkate aldığı, hangi sonuç ölçütlerini optimize ettiği ve hangi performans metrikleriyle değerlendirildiği de önyargı üretimine zemin hazırlayabilir. Örneğin, yalnızca hastanede yatış süresini kısaltmaya odaklanan bir model, bakımın bütüncül kalitesini ve hasta memnuniyetini göz ardı edebilir.

5.3. Uygulama Bağlamından Kaynaklanan Önyargılar

YZ çıktılarının klinik ortamda nasıl yorumlandığı da önemlidir. Hemşireler, algoritmanın önerilerini mutlak doğru olarak kabul ederse, sistemdeki önyargılar klinik kararlara doğrudan yansır. Bu durum “otomasyon yanlılığı” olarak adlandırılır ve profesyonel klinik yargının geri plana itilmesine yol açabilir.

6. HEMŞİRELİK BAKIM PLANLARINDA YAPAY ZEKÂNIN ROLÜ

YZ destekli sistemler, hemşirelik bakım planlamasında aşağıdaki alanlarda kullanılmaktadır:

- Hasta risk skorlarının hesaplanması (düşme riski, bası yarası, sepsis riski vb.)
- Klinik önceliklendirme (triyaj, hasta yoğunluğu yönetimi)
- Bakım girişimlerinin zamanlaması ve sıklığının optimize edilmesi
- Taburculuk planlaması ve evde bakım önerileri

Bu uygulamalar, hemşirelerin karar süreçlerini destekleyerek bakımın etkinliğini artırma potansiyeli taşır. Ancak YZ'nin önerileri, her zaman etik ilkeler ve hemşirelik mesleğinin insani değerleri çerçevesinde değerlendirilmelidir.

7. ETİK İLKELER: ADALET, ŞEFFAFLIK VE HESAP VEREBİLİRLİK

7.1. Adalet ve Eşitlik

YZ destekli bakım planlarının tüm hasta gruplarına adil biçimde hizmet sunması gerekir. Eğer algoritmalar belirli gruplar için sistematik olarak daha düşük doğrulukta çalışıyorsa, bu durum sağlıkta eşitsizlikleri derinleştirir. Hemşirelik etiğinin temel ilkelerinden biri olan adalet, YZ sistemlerinin performansının farklı hasta grupları için düzenli olarak değerlendirilmesini gerektirir.

7.2. Şeffaflık ve Açıklanabilirlik

Bir algoritmanın nasıl karar verdiğinin anlaşılabilir olması, hemşirelerin ve hastaların güvenini artırır. “Kara kutu” olarak çalışan sistemler, etik açıdan sorunludur çünkü hatalı veya önyargılı

sonuçların nedenini açıklamak güçleşir. Açıklanabilir YZ yaklaşımları, bakım planlarının gerekçelendirilmesini kolaylaştırır.

7.3. Hesap Verebilirlik

YZ tarafından önerilen bir bakım planının olumsuz sonuçlara yol açması durumunda sorumluluğun kimde olduğu sorusu önemlidir. Hemşireler, yazılım geliştiriciler, hastane yönetimi ve politika yapımcılar arasında net sorumluluk çerçevelerinin belirlenmesi gerekir. YZ'nin “karar verici” değil, “karar destekleyici” olarak konumlandırılması etik açıdan kritik bir yaklaşımdır.

8. YAPAY ZEKÂ DENETİMİ VE YÖNETİŞİM MEKANİZMALARI

8.1. Klinik Denetim ve İnsan-İçinde-Döngü (Human-in-the-Loop)

YZ sistemlerinin çıktıları, hemşirelerin klinik yargısı ile birlikte değerlendirilmelidir. İnsan-çinde-döngü yaklaşımı, algoritmanın önerilerinin otomatik olarak uygulanmasını engeller ve profesyonel sorumluluğu korur.

8.2. Algoritmik Denetim ve Performans İzleme

Algoritmalar düzenli olarak:

- Doğruluk,
- Hata oranı,
- Farklı hasta gruplarına göre performans açısından izlenmelidir. Bu denetimler, önyargıların erken tespit edilmesine yardımcı olur.

8.3. Etik Kurullar ve Çok Disiplinli Yaklaşım

YZ tabanlı sistemlerin klinik uygulamaya alınmadan önce etik kurullar tarafından değerlendirilmesi önerilir. Bu kurullarda hemşireler, hekimler, bilişim uzmanları, etikçiler ve hukukçular birlikte yer almalıdır.

9. EĞİTİM VE FARKINDALIK: HEMŞİRELERİN ROLÜ

Hemşirelerin YZ okuryazarlığı, algoritmik önyargıların fark edilmesi açısından kritik önemdedir. Eğitim programlarında:

- YZ'nin temel çalışma prensipleri,
- Algoritmik önyargı örnekleri,
- Etik riskler
- Hasta hakları konularına yer verilmelidir.

Bu sayede hemşireler, YZ çıktıları karşısında eleştirel bir bakış açısı geliştirebilir ve hastaların savunucusu rolünü sürdürebilir.

10. GELECEK PERSPEKTİFİ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Gelecekte hemşirelik bakımında YZ kullanımının artmasıyla birlikte, etik yönetim mekanizmalarının güçlendirilmesi gerekecektir. Öneriler:

- Ulusal düzeyde YZ etik rehberlerinin oluşturulması
- Sağlık YZ sistemleri için zorunlu etki değerlendirmeleri
- Algoritmik önyargı testlerinin standart hale getirilmesi
- Hemşirelerin karar destek sistemlerinin tasarım sürecine dahil edilmesi
- Hasta ve hasta yakınlarının bilgilendirilmesi ve onam süreçlerinin güçlendirilmesi

11. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu derlemede ele alınan bulgular, yapay zekâ temelli karar destek sistemlerinin hemşirelik bakım planlarına entegrasyonunun klinik kaliteyi artırma potansiyeline sahip olduğunu; ancak

bu potansiyelin etik risklerle iç içe ilerlediğini göstermektedir. Algoritmik önyargı, verinin üretildiği sosyokültürel bağlamdan, kullanılan model mimarisine ve uygulama ortamına kadar uzanan çok katmanlı bir problem alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, hemşirelik bakımının temel ilkeleri olan adalet, yararlılık, zarar vermeme ve özerklik ilkeleri açısından ciddi bir sınıma oluşturmaktadır.

11.1.Klinik Güvenlik ve Hasta Hakları Boyutu

Yapay zekâ destekli sistemlerin önyargılı veri setleriyle eğitilmesi, belirli hasta gruplarının (yaşlılar, kronik hastalar, düşük sosyoekonomik gruplar, göçmenler vb.) yanlış sınıflandırılmasına ve dolayısıyla yetersiz veya hatalı bakım planları oluşturulmasına neden olabilmektedir. Bu durum, hasta güvenliğini doğrudan tehdit ederken, aynı zamanda bakımda eşitsizlikleri derinleştirme riskini de beraberinde getirmektedir. Hemşirelik bakımında etik sorumluluk yalnızca doğru klinik karar vermekle sınırlı değildir; aynı zamanda sistematik adaletsizlikleri fark etmek ve bunlara karşı savunuculuk yapmayı da kapsar. Bu bağlamda hemşirelerin, algoritmik çıktıları “nihai gerçek” olarak kabul etmek yerine, eleştirel klinik akıl yürütme süzgecinden geçirmesi hayati önem taşımaktadır.

11.2. Mesleki Rol Dönüşümü ve Algoritmik Okuryazarlık

Dün-bugün-yarın perspektifi birlikte değerlendirildiğinde, hemşirelik mesleğinin pasif teknoloji kullanıcılığından aktif algoritmik yönetim paydaşı olmaya evrildiği görülmektedir. Günümüzde pek çok hemşire, yapay zekâ çıktılarının nasıl üretildiği konusunda sınırlı bilgiye sahiptir. Oysa gelecekte hemşirelerden;

- Algoritmik önyargıyı tanıyabilen,
- Klinik kararlar algoritmik öneri arasındaki farkı yorumlayabilen,
- Etik riskleri yönetime raporlayabilen bir profesyonel profil beklenmektedir. Bu durum, algoritmik okuryazarlığın hemşirelik lisans ve lisansüstü müfredatlarına entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır. Aksi halde, teknolojik araçlar bakım kalitesini artırmak yerine, klinik yargıyı zayıflatan ve profesyonel özerkliği aşındıran bir unsur haline gelebilir.

11.3.Kurumsal Yönetişim ve Etik Denetim Mekanizmaları

Yapay zekâ uygulamalarının güvenli ve adil biçimde kullanılabilmesi için bireysel farkındalık yeterli değildir. Sağlık kurumlarında çok disiplinli etik komitelerin (hemşire, hekim, bilişim uzmanı, etikçi, hukukçu) algoritmik sistemleri düzenli olarak denetlemesi gerekmektedir. Bu denetimler;

- Kullanılan veri setlerinin temsiliyetini,
- Algoritmanın hangi gruplarda daha fazla hata ürettiğini,
- Açıklanabilirlik düzeyini kapsamalıdır. Ayrıca, yapay zekâ destekli bakım planlarının klinik uygulamaya alınmadan önce pilot simülasyonlar üzerinden test edilmesi hem hasta güvenliğini artıracak hem de olası etik riskleri erken aşamada görünür kılacaktır.

11.4.Geleceğe Yönelik Stratejik Çıkarımlar

Gelecek perspektifinde etik-içkin (ethics-by-design) yapay zekâ sistemlerinin yaygınlaşması, hemşirelik bakımında daha şeffaf, hesap verebilir ve adil bir teknoloji kullanımını mümkün

kılabilir. Ancak bu dönüşüm, yalnızca teknoloji geliştiricilerin sorumluluğunda değildir. Hemşirelerin;

- Sistem tasarım süreçlerine geri bildirim vermesi,
- Hasta adına algoritmik kararları sorgulayan bir “etik savunucu” rolü üstlenmesi,
- Hasta onamı süreçlerinde yapay zekâ kullanımını açık ve anlaşılır biçimde aktarması gerekmektedir. Bu yaklaşım, hemşirelik mesleğinin insani boyutunu korurken, teknolojik ilerlemenin etik sınırlar içinde kalmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, yapay zekâ ve algoritmik karar destek sistemleri hemşirelik bakımında kaçınılmaz bir gelecek değil, halihazırda şekillenen bir gerçekliktir. Bu gerçekliğin hasta yararına hizmet etmesi; algoritmik önyargının tanınması, etik denetim mekanizmalarının kurumsallaştırılması ve hemşirelerin bu sürecin aktif öznesi haline gelmesiyle mümkündür. Aksi takdirde, teknolojik ilerleme etik ilerlemenin önüne geçecek ve bakım süreçlerinde görünmez adaletsizlikler üretilecektir. Hemşirelik mesleği, insan odaklı doğası gereği, bu dönüşümün etik pusulası olabilecek en güçlü aktörlerden biridir.



Görsel 1. Algoritmik Önyargı ve Etiğin Kavram Haritası

KAYNAKÇA

- [1] Abbasi, Y., Ahmad, M., & Ali, R. (2023). Algorithmic bias in artificial intelligence–based clinical decision support systems: Ethical challenges and mitigation strategies. *AI in Healthcare*, 5(2), 112–124.
- [2] Amann, J., Blasimme, A., Vayena, E., Frey, D., & Madai, V. I. (2020). Explainability for artificial intelligence in healthcare: A multidisciplinary perspective. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 20(1), 310. <https://doi.org/10.1186/s12911-020-01332-6>
- [3] Char, D. S., Shah, N. H., & Magnus, D. (2018). Implementing machine learning in health care—Addressing ethical challenges. *The New England Journal of Medicine*, 378(11), 981–983. <https://doi.org/10.1056/NEJMp1714229>
- [4] European Commission. (2019). *Ethics guidelines for trustworthy AI*. Publications Office of the European Union.
- [5] Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., ... Vayena, E. (2018). AI4People—An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and Machines*, 28(4), 689–707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>
- [6] Grote, T., & Berens, P. (2020). On the ethics of algorithmic decision-making in healthcare. *Journal of Medical Ethics*, 46(3), 205–211. <https://doi.org/10.1136/medethics-2019-105586>
- [7] London, A. J. (2019). Artificial intelligence and black-box medical decisions: Accuracy versus explainability. *Hastings Center Report*, 49(1), 15–21. <https://doi.org/10.1002/hast.973>
- [8] Obermeyer, Z., Powers, B., Vogeli, C., & Mullainathan, S. (2019). Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science*, 366(6464), 447–453. <https://doi.org/10.1126/science.aax2342>
- [9] Raji, I. D., Smart, A., White, R. N., Mitchell, M., Gebru, T., Hutchinson, B., ... Barnes, P. (2020). Closing the AI accountability gap: Defining an end-to-end framework for internal algorithmic auditing. *Proceedings of the 2020 Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 33–44. <https://doi.org/10.1145/3351095.3372873>
- [10] Topol, E. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44–56. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>
- [11] World Health Organization. (2021). *Ethics and governance of artificial intelligence for health*. World Health Organization.

CONTROL OF BRUCELLOSIS IN DAIRY CATTLE: VACCINATION EFFORTS IN EGYPTIAN GOVERNORATES

Prof. Dr. Hossam Eldin Mahmoud
Cairo University, Egypt

Ahmed Zaki
Cairo University, Egypt

Assis. Prof. Dr. Mona El-Sayed
Cairo University, Egypt

Abstract

This paper examines the status and effectiveness of brucellosis vaccination campaigns across multiple Egyptian governorates, focusing on *Brucella abortus* and *Brucella melitensis*. Field surveys combined laboratory assessments of serological responses in over 4,000 dairy cattle and goats. Despite a concerted vaccination effort, outbreak hotspots persisted, traced to logistical lapses, cold-chain failures, and vaccine hesitancy among farmers due to misinformation. Regression analysis of risk factors found significant associations with herd size, open grazing, and lack of follow-up post-vaccination. Stakeholder interviews revealed that continuous educational programs and veterinary follow-up visits were critical in increasing compliance. Policy recommendations include digital tracking of vaccination status, mandatory reporting, and targeted retraining for rural veterinarians. This study contributes actionable insights for controlling zoonotic diseases and improving livestock productivity, with broad implications for food safety and rural livelihoods in Egypt.

Keywords: brucellosis, vaccination, Egypt, dairy cattle, disease management

AVIAN INFLUENZA MONITORING AND BIOSECURITY PRACTICES IN POULTRY FARMS OF EGYPT

Dr. Faten Abdelrahim
Alexandria University, Egypt

Mohamed Saber
Alexandria University, Egypt

Abstract

Avian influenza poses ongoing threats to poultry production and food security in Egypt. This research monitored virus prevalence and evaluated biosecurity measures at commercial and backyard farms in three regions. Over 3,500 samples from birds, workers, and environments were analyzed using PCR and serological assays, revealing sporadic outbreaks and evidence of H5 and H9 strains co-circulating in the region. The study identified critical lapses in quarantine practices, movement control, and disinfection routines, especially in informal farming sectors. Surveys of farm managers highlighted resource constraints, insufficient training, and gaps in government support. Comparison of biosecurity scores confirmed that higher standards correlate strongly with lower outbreak risk and economic loss. The paper emphasizes the need for centralized surveillance, targeted extension services, and regional cooperation on disease reporting. Recommendations include capacity-building, subsidized biosecurity upgrades, and public awareness campaigns to reduce risk and enhance Egypt's poultry sector resilience.

Keywords: avian influenza, Egypt, poultry, biosecurity, surveillance

TICK-BORNE DISEASES IN IRANIAN SHEEP FLOCKS: MOLECULAR DIAGNOSIS AND CONTROL MEASURES

Prof. Dr. Hassan Shirazi
Tehran University, Iran

Assis. Prof. Dr. Sara Foroughi
Tehran University, Iran

Dr. Mohsen Farzi
Tehran University, Iran

Abstract

Tick-borne diseases (TBDs) present significant challenges for sheep production in Iran's arid and semi-arid regions. This study combined field sampling with advanced PCR-based diagnostics to detect pathogens such as *Anaplasma*, *Babesia*, and *Theileria* among 18 flocks in two provinces. Results demonstrated a high prevalence of mixed infections, with spatial analysis linking outbreaks to environmental and management factors. Questionnaires administered to flock owners revealed gaps in tick control practices and misunderstanding of acaricide use and resistance. The cost-effectiveness of different control strategies, including strategic dipping, pasture management, and genetic selection for resistance, was assessed. The findings stress the need for veterinary extension, integrated disease surveillance, and regionally tailored intervention policies. Enhancing collaboration between researchers, veterinary practitioners, and farmers is essential for reducing productivity losses and improving animal welfare in resource-constrained settings.

Keywords: tick-borne diseases, Iran, sheep, molecular diagnosis, animal health policy

VETERINARY EDUCATION REFORM AND PRACTICAL TRAINING IN IRANIAN UNIVERSITIES

Dr. Sahar Kaviani
Shiraz University, Iran

Prof. Dr. Ali Akbar Dehghan Banadaki
Shiraz University, Iran

Abstract

This paper critically evaluates the structure and reforms of veterinary education in Iran, focusing on bridging the gap between theoretical knowledge and practical field training. The study analyzed curriculum frameworks at six major universities, stakeholder workshops, and graduate employment outcomes. Challenges identified include insufficient clinical exposure, outdated teaching resources, and limited industry collaboration. The reformative measures reviewed include curricular integration of new diagnostic technologies, expanded internships, and partnerships with private clinics. Evaluation of pre- and post-reform cohorts indicated significant improvements in clinical competency and problem-solving abilities. Faculty interviews and employer surveys provided feedback on curriculum relevance and industry expectations. The findings demonstrate that innovation in curriculum design and hands-on training are crucial for producing veterinarians ready for modern challenges, and call for sustained investment in faculty development and infrastructure.

Keywords: veterinary education, Iran, curriculum reform, practical training, employability

SURVEILLANCE OF ZONOTIC DISEASES AT THE WILDLIFE-LIVESTOCK INTERFACE IN WESTERN INDIA

Dr. Ramesh Gopalakrishnan
Gujarat Veterinary College, India

Assis. Prof. Dr. Meera Nair
Gujarat Veterinary College, India

Abstract

India's Western region is a hotspot for zoonotic disease emergence due to close wildlife-livestock interactions. This study details three years of surveillance across national parks and bordering livestock farms, focusing on pathogens including foot-and-mouth disease, leptospirosis, and anthrax. Using serological surveillance, GPS tracking, and molecular diagnostics, the research mapped transmission routes and identified risk factors such as habitat fragmentation and unregulated livestock movement. Collaboration with forest rangers and local governments enabled rapid response to outbreaks. The findings highlight effective strategies, such as buffer zone vaccination, stakeholder education, and cross-sectoral reporting systems to mitigate transmission risks. Insights inform the development of early warning and contingency plans, advancing the One Health approach.

Keywords: zoonoses, India, wildlife-livestock, surveillance, One Health

EVALUATION OF TRYPANOSOMIASIS CONTROL PROGRAMS IN INDIAN DAIRY CATTLE

Prof. Dr. Priya Sreenivasan

Tamil Nadu Veterinary and Animal Sciences University, India

Dr. Bhaskar Rao

Tamil Nadu Veterinary and Animal Sciences University, India

Dr. Aparna Nair

Tamil Nadu Veterinary and Animal Sciences University, India

Abstract

Trypanosomiasis, a vector-borne disease, threatens dairy productivity in southern India. This study assesses national and state control campaigns, including chemotherapeutic protocols, vector management, and farmer outreach. Data from 40 dairy cooperatives revealed sporadic outbreaks linked to altered rainfall patterns and surveillance lapses. Interviews with farmers and veterinarians showed awareness gaps and drug resistance as persistent problems. The cost-effectiveness and impact of control measures were examined through milk yield, morbidity, and economic loss metrics. The research advocates for integrated vector management, periodic training, and strengthening public–private partnerships. The paper concludes with an agenda for tailored region-specific interventions and highlights ongoing research on vaccine candidates.

Keywords: trypanosomiasis, India, dairy cattle, disease control, vector management

PHOTOCATALYTIC WATER SPLITTING USING NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE

Assis. Prof. Dr. Afsaneh Ramezani
Sharif University of Technology, Iran
Ali Jamshidi
Sharif University of Technology, Iran

Abstract

This paper presents the synthesis, characterization, and water splitting performance of nanostructured titanium dioxide (TiO₂) photocatalysts. Advanced hydrothermal and sol-gel techniques were employed to control particle size, morphology, and phase composition. XRD, TEM, UV-Vis, and BET analyses confirmed the production of anatase-rich TiO₂ with superior surface area and light absorption properties. Lab-scale photoreactors tested the hydrogen evolution under simulated solar irradiation, comparing the effects of doping with transition metals and non-metals on photocatalytic efficiency. Results revealed enhanced hydrogen yields with doped TiO₂, attributed to reduced recombination rates and increased charge carrier mobility. The research discusses practical challenges including scalability, photo-corrosion, and long-term stability, proposing directions for further optimization. This work offers insights for developing efficient, low-cost solar hydrogen generation technologies, supporting Iran's efforts in renewable energy research.

Keywords: photocatalysis, water splitting, titanium dioxide, nanomaterials, hydrogen production

A GREEN SYNTHESIS APPROACH TO BIODEGRADABLE POLYMERS FROM RENEWABLE FEEDSTOCKS

Dr. Priyanka Singh
Indian Institute of Science, India
Manoj Raval
Indian Institute of Science, India

Abstract

Addressing the challenge of plastic waste, this study introduces a green synthesis route for producing biodegradable polymers from renewable plant-based feedstocks. A variety of biomass derivatives—including starch, cellulose, and vegetable oils—were polymerized using environmentally benign catalysts and mild reaction conditions. NMR, GPC, and DSC analyses confirmed the synthesis of polyesters and polyhydroxyalkanoates with tunable thermal and mechanical properties. The study delves deeply into the polymerization kinetics, molecular weight distributions, and processing conditions for each type of monomer. Biodegradability tests under simulated soil and aquatic environments demonstrated rapid material disintegration and low ecological toxicity. The work further examines the lifecycle assessment, highlighting reduced carbon footprint compared to petroleum-based plastics. The research ultimately advocates for policy interventions and industry partnerships to accelerate the market adoption of bio-based, ecofriendly polymers—positioning India as a leader in sustainable plastics innovation.

Keywords: green synthesis, biodegradable polymers, renewable feedstocks, sustainable chemistry, bioplastics

ORGANIC-INORGANIC HYBRID PEROVSKITES FOR NEXT-GENERATION SOLAR CELLS: DESIGN AND STABILITY ANALYSIS

Dr. Sonal Mehra
Indian Institute of Technology Bombay, India
Ajay Bhargava
Indian Institute of Technology Bombay, India

Abstract

This research investigates the design, synthesis, and stability of organic-inorganic hybrid perovskite materials for high-efficiency solar cells. State-of-the-art fabrication techniques, such as solution processing and vapor-assisted deposition, were used for preparing perovskite thin films with varied cation and halide compositions. Advanced characterization tools (SEM, XPS, absorption spectroscopy) provided a deep understanding of structure-property relationships. Device testing under standard conditions revealed efficiencies exceeding 22%, but long-term testing highlighted challenges in device stability due to moisture and thermal effects. The study discusses material engineering solutions, including encapsulation, compositional tuning, and defect passivation, to address degradation pathways. Implications for scalable production and commercial viability are evaluated. The findings position hybrid perovskites as promising, but not yet fully optimized, candidates in solar energy technologies for India's renewable energy transition.

Keywords: perovskites, solar cells, hybrid materials, stability, renewable energy

SYNTHESIS OF FUNCTIONALIZED GRAPHENE OXIDE FOR ORGANIC DYE REMOVAL FROM WATER

Dr. Kavita Agarwal
Jawaharlal Nehru University, India

Abstract

Focusing on environmental remediation, this study details the synthesis of chemically functionalized graphene oxide (GO) for removing organic dyes from polluted water. The GO surface was modified with amino and carboxyl groups to boost adsorption capabilities. Batch adsorption experiments evaluated removal efficiencies for dyes such as methylene blue and rhodamine B under various pH and temperature conditions. Kinetic, isotherm, and thermodynamic analyses informed adsorption mechanisms and capacity. Reusability tests demonstrated functionalized GO's stability and regenerability. The work proposes the integration of GO adsorbents in water treatment plants and discusses the translation of laboratory findings to scalable applications. The research confirms GO's effectiveness as a sustainable, high-surface-area adsorbent, especially for rapid and cost-efficient dye removal in India's textile and chemical industries.

Keywords: graphene oxide, water treatment, adsorption, organic dyes, environmental remediation

BIOCATALYTIC SYNTHESIS OF PHARMACEUTICAL INTERMEDIATES USING ENZYME IMMOBILIZATION STRATEGIES

Prof. Dr. Nour-eddine Bouziane
University of Algiers, Algeria
Assis. Prof. Dr. Lamia Cherif
University of Algiers, Algeria
Dr. Rachid Benyounes
University of Algiers, Algeria

Abstract

This research evaluates biocatalytic synthesis routes for pharmaceutical intermediates using innovative enzyme immobilization techniques. Different supports—such as silica, polymers, and magnetic nanoparticles—were tested for covalent binding and encapsulation of lipase and protease enzymes. Detailed kinetic studies assessed the conversion efficiency of key pharmaceutical precursors, comparing immobilized and free enzyme preparations. Recyclability, operational stability, and product purity were thoroughly analyzed. The study found that immobilized enzymes offer superior activity retention and industrial practicality. Data supports the scalability of these methods for Algeria's pharmaceutical sector, promoting greener, more efficient drug production with minimal waste. The research outlines future perspectives for expanding enzyme libraries and optimizing immobilization chemistry to further enhance process yields.

Keywords: biocatalysis, enzyme immobilization, pharmaceutical synthesis, green chemistry, industrial applications

CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM ALLOYS IN AGGRESSIVE INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

Prof. Dr. Hakim Khellaf
University of Oran, Algeria
Dr. Noor Ahmed
University of Oran, Algeria

Abstract

This paper investigates the corrosion resistance of new-generation aluminum alloys engineered for use in severe industrial environments, such as refineries and marine infrastructure. Alloys with carefully controlled microstructure and alloying elements (Mg, Zn, Cu) were subjected to accelerated corrosion testing, electrochemical analysis, and surface characterization by SEM/EDS. Results indicate substantial improvements in pitting resistance and uniform corrosion rates, attributed to grain boundary engineering and surface passivation. The mechanisms of passive layer formation and breakdown were elucidated, providing insights for alloy optimization and protective coating development. Recommendations extend to industrial deployment, maintenance practices, and lifecycle monitoring—essential for enhancing infrastructure durability in Algeria’s key economic sectors.

Keywords: aluminum alloys, corrosion resistance, industrial environments, materials engineering, surface analysis

TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MATERYAL (PCM) KULLANIMI

Arş. Gör. Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM

Iğdır Üniversitesi, kaan.kucukerdem@igdir.edu.tr-ORCID ID: 0000-0002-1593-4725

Dr. Öğr. Üyesi Ümran ATAY

Mardin Artuklu Üniversitesi, umranatay@artuklu.edu.tr-ORCID ID: 0000-0002-2248-4582

Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

Çukurova Üniversitesi, hhozturk@cu.edu.tr-ORCID ID: 0000-0001-6904-5539

ÖZET

Tarımsal yapılarda faz değiştiren materyaller (PCM) kullanmak, binaların ısı performansını ve enerji verimliliğini artırır. Tarımsal yapıların değişen enerji taleplerinin daha iyi yönetilmesini sağlar. Bu çalışmada, PCM'nin bina malzemelerine entegrasyonuna odaklanan deneysel, sayısal ve hibrit çalışmadan elde edilen bulgular incelenmiş, erime sıcaklığı, gizli ısı, ısı iletkenlik, katman kalınlığı ve iklim uygunluğu gibi PCM performansını etkileyen temel değişkenler değerlendirilmiş, duvarlar, çatılar, zeminler ve tavanlar gibi çeşitli bina bileşenleri arasında PCM yerleştirme yöntemleri (iç, orta ve dış) karşılaştırılmış, çeşitli iklim bölgelerinde ve farklı bina yönelimlerinde PCM'lerin etkinliği değerlendirilmiş ve enerji açısından verimli uygulamaları desteklemek için nicel sonuçlara dayalı pratik tasarım önerileri derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tarımsal yapılar, İklimlendirme, Faz değiştiren materyal (PCM)

1. GİRİŞ

Binalar ve altyapı tesisleri, enerji tüketiminde ve sera gazlarının (GHG) atmosfere salınmasında önemli bir rol oynar. İklim değişikliğine olan etkileri azaltmak için enerji tasarrufuna artan ilgi ile inşaat sektöründe, bina verimliliğini iyileştirme yöntemlerine giderek daha fazla öncelik verilmektedir. Tarımsal yapılar; boyutları, yüksek doluluk oranları ve ısıtma, havalandırma ve klima (HVAC) sistemlerine bağımlılıkları nedeniyle yoğun olarak enerji tüketilen binalar arasında yer alır. Bu yapıların çoğu, kışın önemli ısı kaybına, yazın ise ısı kazanımına yol açabilen ısıl olarak iletken malzemelerden yapılmış kalın duvarlara sahiptir. Faz değiştiren materyaller (PCM), tarımsal yapılarda ısıl düzenlemeyi iyileştirmek ve ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmak için etkin çözümlerden birisidir. PCM'ler, yüksek enerji üretilen dönemlerde fazla ısı enerjisini depolar ve yüksek talep zamanlarında serbest bırakarak, aşırı enerji yüklerini azaltmaya ve arzı tüketimle dengelemeye yardımcı olur. Ayrıca, PCM'ler, iç ortam sıcaklıklarını pasif olarak düzenleyerek enerji verimliliğini artırır ve ısıl konforu iyileştirir, aktif ısıtma ve soğutma sistemlerine olan bağımlılığı azaltır. Bu durum, enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltır. Bu nedenle, tarımsal yapılarda PCM kullanmak, binaların ısıl performansını ve enerji verimliliğini artırır. Faz değiştiren materyaller (PCM), tarımsal yapılarda ısıl düzenlemeyi iyileştirmek ve ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmak için

etkin çözümlerden birisidir. PCM’ler, yüksek enerji üretilen dönemlerde fazla ısı enerjisini depolar ve yüksek talep zamanlarında serbest bırakarak, aşırı enerji yüklerini azaltmaya ve arzı tüketimle dengelemeye yardımcı olur. Ayrıca, PCM’ler, iç ortam sıcaklıklarını pasif olarak düzenleyerek enerji verimliliğini artırır ve ısıl konforu iyileştirir, aktif ısıtma ve soğutma sistemlerine olan bağımlılığı azaltır. Bu durum, enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltır. Bu nedenle, tarımsal yapılarda PCM kullanmak, binaların ısıl performansını ve enerji verimliliğini artırır.

2. FAZ DEĞİŞTİREN MATERYALLER

Faz değiştiren materyallerin (PCM) türü ve entegrasyon yöntemleri, belirli bir uygulamada optimum etkinlik için istenen özelliklerle uyumlu olacak şekilde dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Bu özellikler erime sıcaklığı, gizli ısı kapasitesi, özgül ısı ve ısıl iletkenlik gibi ısıl özelliklerdir. PCM’lerin birincil özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Bina Uygulamalarında Kullanılan Farklı Faz Değiştiren Materyallerin (PCM) Isıl Özellikleri (Alassaad ve Ark., 2025)

Faz Değiştiren Materyal (PCM)	Isı İletkenlik (Sıvı→Katı) λ (W/m°C)	Gizli Isı Kapasitesi (L) (kJ/kg)	Özgül Isı (Sıvı→Katı) c_p (J/kg°C)	Erime Sıcaklığı (°C)
Kalsiyum klorür heksahidrat (CaCl ₂ •6H ₂ O)	0,53/1,09	187	1530/1710	29,9
InfiniteRPCM	0,54/1,09	200	3140	18–21–23–25–29
BioPCM27	1,50/1,80	225	2000	21–23–25–27–29
Infinite R TM	0,54/1,09	200	3140	19–30
Parafin	0,2	180	2230	20
Tuz hidratı (CaCl ₂ •6H ₂ O)	0,54/1,08	122,3/116,9	2310/1340	26
RT27 (Organik)	0,2	180	1800/2400	26
RT42 (Organik)	0,21	220	3200	42
Setan	0,2	231	2800/3200	18
Heptadekan	0,2	200	2800/3200	22
Oktadekan	0,2	241	2800/3200	28
Tuz hidratı	0,476/0,514	281	1442/1520	35
Infinite RPCM25C	0,815	200	3140	25
Infinite RPCM18C				18
n-oktadekan ve n-heptadekan	0,213	187,6	1662	23
Belirtilmemiş	0,25/0,5	216	1785	18–26
Organik (RT 28)	0,2	250	-	28
Organik (RT 18)		260		18
PCM-25	0,54/1,059	200	1540	25
PCM-29				29
Parafin mumu (RT35 HC)	0,2	240	2000	35
Parafin mumu (RT44 HC)		250	2000	44
Rubitherm® RT25HC	0,2	230	2000	25

2.1. Erime Sıcaklığı

PCM’nin erime sıcaklığı, beton bir yapı içinde ısı kontrol için hedef sıcaklık aralığıyla uyumlu olması gerektiğinden, etkili sıcaklık düzenlemesi için önemlidir. PCM’nin ısıyı soğurduğu veya saldığı faz değişim süreci, optimum performansı sağlamak ve en yüksek enerji tasarrufuna ulaşmak için günlük veya mevsimsel sıcaklık dalgalanma aralığında gerçekleşmelidir. Wang ve Ark. (2018), PCM’lerin eklenmesi, PCM18P ile yaklaşık 4 °C ve PCM25P ile 5 °C’lik hidrasyon sırasında önemli sıcaklık azalmalarına neden olduğunu

bildirmişlerdir. Daha yüksek erime sıcaklığına (25 °C) sahip PCM, kontrol ile karşılaştırıldığında tepe sıcaklığını yaklaşık 60 dakika geciktirirken, PCM18P karışımı 35 dakikalık bir gecikme göstermiştir. Ayrıca, sıcak yaz koşullarında Şanghay'daki bir binada bir simülasyon çalışması yapmışlardır. Farklı erime noktalarına (31 °C, 35 °C, 42 °C, 47 °C, 50 °C ve 55 °C) sahip PCM'lerin ısı akışını azaltmada farklı etkililiklere sahip olduğu belirlenmiştir. 42 °C RT42 erime sıcaklığına sahip PCM en iyi performansı göstermiştir ve en eksiksiz erime-katılma döngüsünü belirlenmiştir. Ofis saatleri sırasında diğer çok erken eriyen veya tamamen katılaşmayan PCM'lere kıyasla %28,3 oranında en yüksek ısı kazanımı azaltma oranı gerçekleşmiştir.

Optimum enerji tasarrufları genellikle tipik iç mekan konfor sıcaklıklarına karşılık gelen 24 °C ile 26 °C arasındaki PCM erime sıcaklıklarıyla belirlenmiştir. Her erime noktası, belirli referansları tanımlayan semboller ve renklerle ayrı bir deneysel veya simülasyon tabanlı çalışmayı temsil etmektedir. Bu eğilim, pasif enerji tasarruflarını en üst düzeye çıkarmak için PCM ısı özelliklerinin ortam ısı yükleriyle eşleştirilmesinin önemini vurgular.

Terhan ve Ilgar (2023), PCM'leri dış duvarlara yerleştirmenin etkisini değerlendirmek için enerji simülasyon yazılımı kullanarak İstanbul'da bulunan bir konut binası modeli konusunda bir çalışma yapmışlardır. Analizde, çeşitli erime sıcaklıkları dikkate alınmış ve binanın yıl boyunca ısıtma ve soğutma enerjisi talepleri değerlendirilmiştir. 21 °C ile 23 °C arasındaki erime sıcaklıklarına sahip PCM'lerin en yüksek enerji tasarrufu sağlandığı, %21,32 ısıtma ve %24,45 soğutma enerjisi tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir.

Zhou ve Ark. (2024), kuru iklim koşullarında *Trombe duvar*ların ısı performansı üzerinde PCM erime noktalarının etkilerini araştırmışlardır. Simülasyonlar, yazın, 38 °C erime noktasına sahip bir PCM tabakası kullanılması maksimum tepe yükünü %48,9 oranında ve sıcaklık dalgalanmasını %76 oranında ve soğutma yükünü %14,4 oranında azaltmıştır. Maksimum iç mekan sıcaklıkları için 4,5 saat ve minimum iç mekan sıcaklıkları için 6,1 saat süre gecikmeleri belirlenmiştir. Kışın, 30 °C erime noktasına sahip bir PCM ısı yükü %38,2 oranında ve dalgalanmaları %28,5 oranında azaltmıştır.

Sonuçlar, uygun bir erime noktasına sahip bir PCM seçmenin ısı düzenlemeyi optimize etmek için çok önemli olduğunu, çünkü tepe sıcaklıklarını etkili bir şekilde azalttığını ve ısı salınımını geciktirdiğini, daha kararlı ısı koşullar sağladığını ve ısı genleşmeyle ilişkili riskleri en aza indirdiğini göstermektedir.

2.2. Faz Değiştiren Materyallerin Isıl Özellikleri

PCM'ler, binaların ısı performansını artırma potansiyelleri nedeniyle son yıllarda önemli ilgi görmüştür. Bina uygulamalarında etkinliklerini etkileyen PCM'lerin başlıca özellikleri; ısı iletkenlik, gizli ısı ve özgül ısı değerleridir. Bu özelliklerin her biri, bir PCM'nin ısıyı ne kadar iyi soğurabileceğini, depolayabileceğini ve serbest bırakabileceğini belirlemede önemli bir rol oynar. Bu özellikler bir binanın enerji verimliliğini ve ısı konforunu doğrudan etkiler. Isı iletkenlik, ısı transfer hızını etkiler; PCM'lerin düşük ısı iletkenliği, ısıyı yavaş bir şekilde soğurmalarına ve serbest bırakmalarına olanak tanır. Bu özellik, zaman içinde daha kararlı bir sıcaklığın korunmasına yardımcı olur ve enerji tüketimin azaltarak ısı konforu iyileştirir. Faz değişimi sırasında soğurulan veya serbest bırakılan enerji olan gizli ısı, ısı enerjisi depolaması için çok önemlidir. Sıcak dönemlerde ısıyı depolayarak ve soğuk

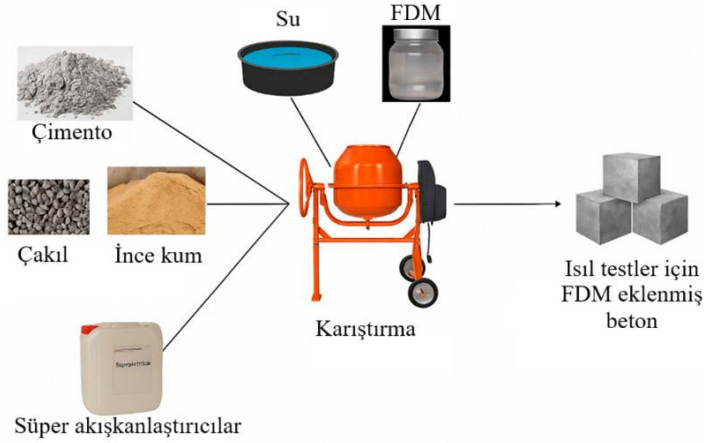
dönemlerde serbest bırakarak iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını azaltır. Özgül ısı (c_p), bir PCM'nin duyulur ısı olarak ne kadar ısı depolayabileceğini etkiler ve faz geçişlerinden önce ve sonra binanın ısıl kütesine katkıda bulunur. Bu özellikler, PCM'lerin iç mekan sıcaklıklarını dengelemesine, ısı akışını azaltmasına ve yapı malzemelerine entegre edildiğinde genel enerji verimliliğini iyileştirmesine olanak tanır.

Li ve Ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, alçı, kil tuğla ve çimentodan yapılmış bir duvar yapısında PCM'ler test edilmiştir. Isıl iletkenlik, özgül ısı ve gizli ısı gibi termofiziksel özellikler değerlendirilmiştir. 177 kJ/kg gizli ısıya, 7085 J/kg·K özgül ısıya ve 0,148 W/m·K ısıl iletkenliğe sahip PCM olarak kullanılan Enerciel 22'nin ısı transferini %15,6–47,6 oranında azalttığı belirlenmiştir. Buna karşılık, 190 kJ/kg, 3020 J/kg·K ve 1 W/m·K değerlerine sahip $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ısı transferini sadece %2–7,8 oranında azaltmıştır. Bu durum, PCM'lerde daha düşük ısıl iletkenlik ve daha yüksek özgül ısı değerlerinin ısı transferi azalmasını artırdığını gösterir.

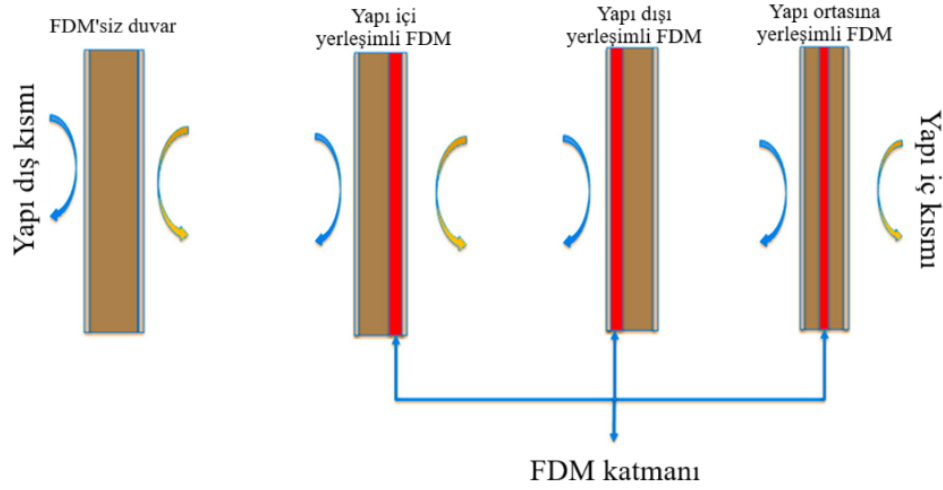
Zhang ve Ark. (2021), PCM ısıl iletkenliğinin ve gizli ısının etkisini araştırmışlardır. PCM'lerin ısıl iletkenliğinin ısıl düzenlemedeki etkinliklerini belirlemede kritik olduğunu belirlemişlerdir. Daha yüksek ısıl iletkenlik, PCM'nin faz değişimi sürecinde ısıyı daha verimli bir şekilde soğurmasını ve salmasını sağlar. Çalışmada, 100 ile 200 kJ/kg arasında gizli ısıya sahip PCM'ler incelenmiştir. Isıl iletkenliğin bu aralıkta gizli ısıya göre performans üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Geliştirilmiş bir ısıl iletkenlik, ısının PCM'den hızla aktarılabilmesini sağlayarak sıcaklık değişimlerine daha hızlı tepkiler verilmesini ve daha verimli bir ısı enerjisi depolama sistemiyle sonuçlanmasını sağlamıştır. Bu durum, enerji tasarruflarını optimize etmek ve bina uygulamalarında konforu korumak için daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip PCM'leri seçmenin önemini vurgulamaktadır.

3. BİNALARDA FAZ DEĞİŞTİREN MATERYAL UYGULAMALARI

PCM'ler, Görsel 1'de gösterildiği gibi, beton matrisine gömülebilir veya Görsel 2'de gösterildiği gibi ayrı bir katman olarak uygulanabilir. Görsel 2'deki yapılandırmalar, PCM kullanılmayan referans duvarı ve duvar kesitine göre iç, dış ve orta konumlara yerleştirilmiş PCM kullanılan duvarları göstermektedir. Diyagram, PCM yerleşiminin pasif bina sistemlerinde dış ortamdan iç ortama ısı akışı nasıl etkilediğini göstermektedir. Bu tür PCM uygulamaları ile ısı depolama kapasitesi artırılabilir ve ısıyı soğurarak ve serbest bırakarak iç mekan sıcaklıklarının düzenlenmesine yardımcı olunur. Bu entegrasyon enerji verimliliğini artırır, ısıtma ve soğutma sistemlerine olan bağımlılığı azaltır ve daha kararlı ve konforlu iç ortam oluşmasına katkı sağlar.

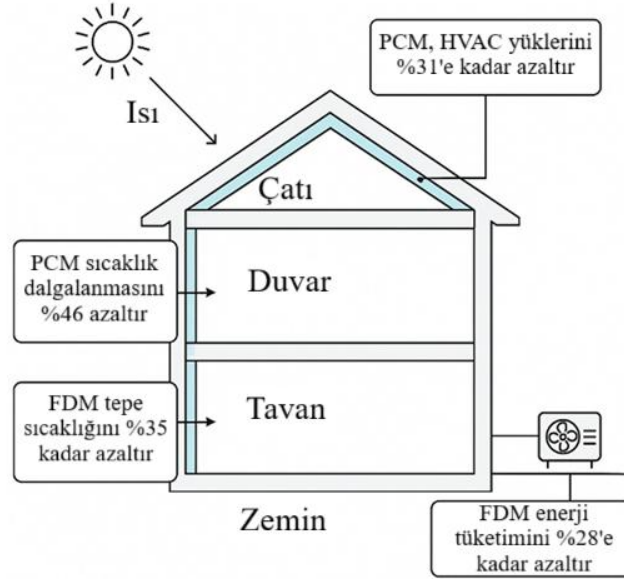


Görsel 1. Faz Değiştiren Materyalin (PCM) Betona Gömülmesi Sürecini Gösteren Şema (Alassaad ve Ark., 2025)



Görsel 2. Duvar İçinde Faz Değiştiren Materyal (PCM) Katmanının Farklı Olası Konumlarını Gösteren Bir Duvar Kesitinin Şematik Gösterimi (Alassaad ve Ark., 2025)

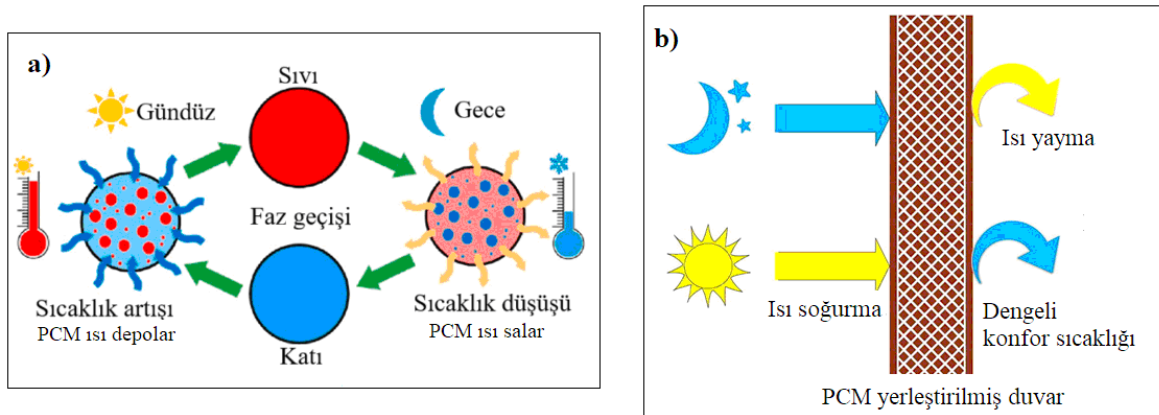
PCM'nin farklı bina bileşenlerine entegrasyonu ile ilgili olarak, PCM'ler duvar, çatı, zemin ve tavan sistemlerine başlıca iki şekilde entegre edilebilir. Bu tasarımlar belirgin katmanlı bir uygulama veya gömülü sistemler olarak Görsel 3'de gösterilmiştir. Katmanlı uygulamalarda, PCM panelleri duvar yapısının içine yerleştirilir, genellikle yalıtım malzemeleri arasına sıkıştırılır veya duvar panellerinin yüzeyine uygulanır, bu da kurulum ve yeniden donatma kolaylığı sağlar. Son araştırmalar ayrıca çok katlı binalarda PCM'leri yerleştirmek için yenilikçi boşluklar olarak katlar arası boşluk oluşturucuların kullanımını da araştırmıştır.



Görsel 3. Faz Değiştiren Materyalleri (PCM) İçeren Bir Bina Kabuğunun Kavramsal Çizimi (Alsaad ve Ark., 2025)

PCM'ler, ısıyı pasif olarak soğurmak ve serbest bırakmak, iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını, tepe sıcaklıklarını ve genel ısıtma ve soğutma enerji talebini azaltmak için duvarlara, tavanlara ve çatılara gömülür. Görsel 3'de verilen şema, PCM'lerin bina uygulamalarında termal konfor artırma ve enerji tüketimini azaltma potansiyelini göstermektedir.

Bu yaklaşım (Görsel 4a), gündüz boyunca aşırı ısıyı soğurarak ve daha soğuk dönemlerde serbest bırakarak iç mekan sıcaklıklarını düzenlemeye esnek ve etkilidir. PCM yerleştirilmiş duvar malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar, iç mekan sıcaklıklarını sabitleyerek ve ısıtma ve soğutma yüklerini azaltarak ısı düzenlemeyi ve enerji verimliliğini artırma potansiyellerini vurgulamaktadır. Dardouri ve Ark. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, PCM'leri binaların çatısına ve duvarlarına yerleştirmenin enerji tasarrufu etkilerini değerlendirmiştir. PCM'leri çatıya yerleştirildiğinde, ısıtma ve soğutmada %31,42 oranına kadar azalma ile önemli düzeyde enerji tasarrufu sağlamıştır. PCM'ler duvarlara yerleştirildiğinde (Görsel 4b), ısıtma ve soğutma için enerji tasarrufu %9 oranına kadar yükselmiştir.

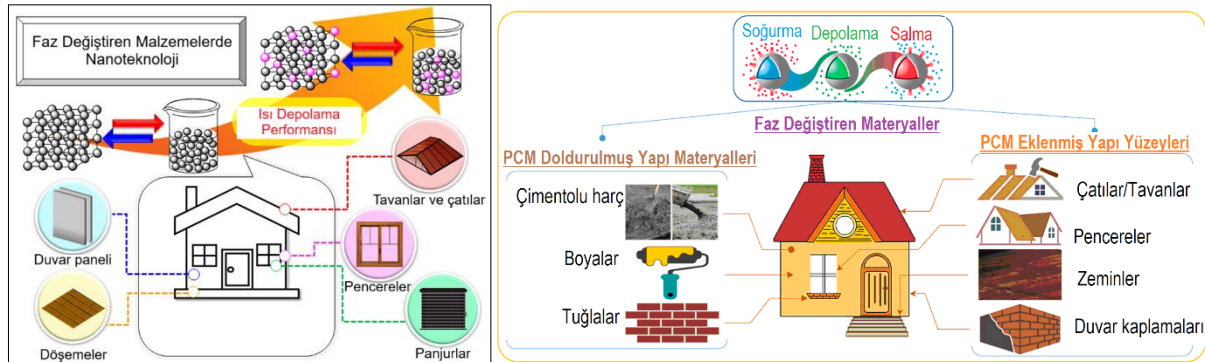


Görsel 4. a) PCM Tarafından Isı Soğurulması Ve Serbest Bırakılması, b) Duvara Yerleştirilmiş PCM'nin Çalışma İlkesi

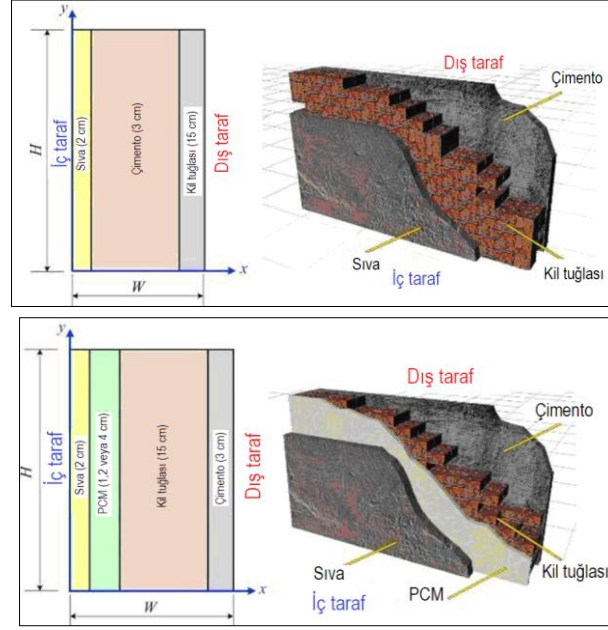
3.1. Faz Değiştiren Materyalin Bina Duvarına Yerleştirilmesi

Önceki araştırmalar, Görsel 5’de gösterildiği gibi, bina kabuğu içindeki PCM konumunun bina kabuğunun ısı performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Nizovtsev ve Sterlyagov (2024), bir duvardaki PCM katman konumunun etkisini incelemişlerdir. PCM katmanı için en uygun yerin, ısı akışı dalgalanmalarını 13 kat azalttığı ve ısı transferini 6,2 saat geciktirdiği duvarın merkezi bölgesi olduğunu ve en iyi ısı performansı sağladığını belirlemişlerdir. PCM’yi iç yüzeye yerleştirmek daha az etkilidir. Daha yüksek ısı akışı dalgalanmaları ve daha kısa bir gecikmeyle, ancak yine de ısı akışı yoğunluğunun 35–40 W/m² değerine ulaşmasıyla termal ataleti önemli ölçüde iyileştirmiştir. PCM’yi dış yüzeye yakın yerleştirmek, ısı akışında minimum bir azalma ile en az faydayı sağlamıştır.

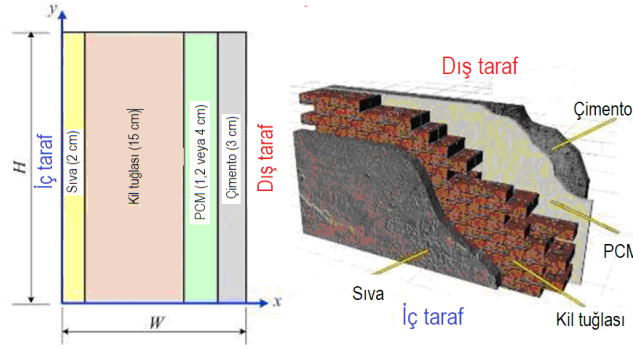
Li ve Ark. (2021), duvarlardaki PCM katman yerleşiminin bina ısı performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. PCM’i iç yüzeye daha yakın yerleştirmenin ısı düzenlemeyi iyileştirdiği ve iç ortam sıcaklığını daha uzun süre konfor bölgesinde tuttuğu belirlenmiştir. Bunun aksine, dış ortama yakın yerleştirmek, dış ortam koşullarına daha fazla maruz kalma nedeniyle iç ortam yerleşimine kıyasla %84 oranında verim azalmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, PCM’i iç ortama yakın yerleştirmek ısı performansı ve enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkarmıştır. Bunun başlıca nedeni, iç yerleşimin yalıtımın dış ısıya karşı bir bariyer görevi görmesini sağlayarak, PCM’in doğrudan dış koşullara maruz kalmasını engellemesi ve bunun da ısı depolama kapasitesinin erken erimesine ve doygunluğuna neden olabilmesidir.



Görsel 5. Binanın Farklı Bileşenlerinde Faz Değiştiren Materyal (PCM) Kullanımı



a) PCM Kullanılmayan Duvar Kesiti b) PCM İç Tarafa Yakın Yerleştirilmiş Duvar Kesiti



c) PCM Dış Tarafa Yakın Yerleştirilmiş Duvar Kesiti

Görsel 6. Bina Duvarına PCM Yerleştirilmesi (Sun ve Ark., 2014)

İç, dış ve orta olmak üzere üç farklı duvar konumuna yerleştirilen PCM'ler kullanılarak binaların ısı performansını incelenmiştir. PCM'leri duvarın iç kenarına yerleştirmenin, konfor bölgesindeki iç sıcaklığının yaklaşık %99'u için üstün ısı performans sağlamıştır. Bu durum yazın %20 ve %53, kışın ise orta ve dış yerleşimlere kıyasla sırasıyla, %23 ve %43 oranında arttırmıştır (Lagou ve Ark., 2019). Bu yapılandırma, iç ortam sıcaklık dalgalanmalarıyla daha iyi uyum sağlayarak enerji depolama ve salımını optimize etmiştir. Li ve Ark. (2019), PCM'in duvarlara yerleştirilmesinin ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. PCM dış yüzeye daha yakın konumlandırıldığında, ısı transferini daha etkili bir şekilde azaltmış ve yaklaşık %47,6 oranında azalma belirlenmiştir. PCM'in iç ortama daha yakın yerleştirilmesi yaklaşık %46,8 oranında biraz daha düşük bir azalma sağlamıştır. Bu bulgular, PCM konumlandırmasının ve malzeme seçiminin enerji verimliliğini artırmadaki önemini vurgulamaktadır.

3. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bina yapılarına PCM'lerin entegrasyonunun ısı performansını önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte PCM'lerin etkinlikleri çeşitli kritik faktörlerden etkilenir. PCM'lerin erime sıcaklığı, optimum ısı performans için çok önemlidir. Erime sıcaklığı, günlük ve mevsimsel sıcaklık dalgalanmaları sırasında etkili ısı soğutulması ve salımını sağlamak için iç ortam sıcaklık aralığıyla uyumlu olmalıdır. Çalışmalar, yerel iklim koşullarına uygun erime sıcaklıklarına sahip PCM'lerin seçilmesinin, en yoğun ısıtma veya soğutma dönemlerinde iç ortam sıcaklıklarını sabitleyerek enerji tasarrufunu %50 oranına kadar önemli ölçüde artırabileceğini bildirmektedir. Ayrıca, erime sıcaklığı sadece bir yük/sezon (ısıtma veya soğutma) için tasarlanmışsa, PCM'ler tüm yıl boyunca yeterli faydaya sahip olmayabilir veya daha da kötüsü, istenmeyen ısı etkileri üretebilir.

PCM'lerin ısı iletkenlik, gizli ısı ve özgül ısı gibi ısı özellikleri, performansları için önemlidir. Yüksek gizli ısı, daha fazla enerji depolama kapasitesine olanak sağlarken, yeterli ısı iletimi, faz geçişleri sırasında etkin ısı transferi sağlar. Özgül ısı, bir malzemenin duyulur ısıyı depolama yeteneğini etkiler. Bu durum binalarda etkili ısı yönetim için optimize edilmiş ısı özelliklere sahip PCM'lerin seçimini önemli hale getirir.

PCM katmanlarının kalınlığı, ısıyı depolama ve serbest bırakma etkinliklerini doğrudan etkiler. Daha kalın PCM katmanları daha fazla ısı kütle sağladığından, etkin enerji depolama ve uzun süreli ısı düzenlemeye olanak sağlar. Ancak, belirli bir kalınlığın ötesinde kazanımlar azalır. Bu durum ısı performans ile maliyet ve kurulum gibi pratik konular arasında optimum bir dengeye ihtiyaç olduğunu gösterir.

PCM'lerin etkinliği farklı iklim bölgelerinde değişir. Daha sıcak iklimlerde, PCM'ler gündüz aşırı ısıyı soğurarak ve geceleri serbest bırakarak soğutma yüklerini azaltabilir. Daha soğuk iklimlerde, gündüz ısıyı depolayarak ve geceleri ısı kaybını en aza indirerek sıcaklığın korunmasına yardımcı olurlar. Bu nedenle, enerji tasarrufunu ve ısı konforu en üst düzeye çıkarmak için PCM özelliklerinin iklime özgü özelleştirilmesi gereklidir.

PCM'lerin duvarlar, çatılar ve zeminler gibi yapı bileşenlerine yerleştirilmesi, performanslarında önemli bir rol oynar. Örneğin, ılıman iklimlerde, PCM'lerin duvarlara ve çatılara yerleştirilmesi %31 oranına kadar enerji tasarrufu sağlarken, sıcak iklimlerde, en yüksek iç ortam sıcaklıkları 5 °C'ye kadar azaltılarak ısı konforu artırılmıştır. Binaların çatıları genellikle en yüksek düzeyde güneş ışınımına maruz kalır. Bu durum soğutma taleplerini azaltmak amacıyla PCM kullanımını ideal hale getirirken, duvarlar ısı yalıtımını artırmak ve sabit iç ortam sıcaklıklarını korumak için optimize edilebilir.

PCM katmanının bir duvar tertibatı içindeki konumu, ısı transferi ile nasıl etkileşime girdiğini etkiler. PCM'lerin iç tarafa daha yakın olarak yerleştirilmesi, zaman gecikmelerini uzatarak ve ısı akışını %46'dan fazla azaltarak iç ortam konforunu korumak için daha etkilidir. Çünkü bu uygulama daha iyi ısı soğutulması ve gecikmeli ısı salımı sağlar. Tersine, dış yerleşimler PCM'leri dış ortam sıcaklık dalgalanmalarına maruz bırakabilir. Bu durum PCM'lerin verimliliklerini azaltabilir.

Binaların yönü, PCM'lerin güneş ışınımı ve ortam sıcaklıklarıyla nasıl etkileşime girdiğini etkiler. Örneğin, uzun süre güneşe bakan duvarlar ve çatılar, güneş ısını soğurmak ve depolamak için PCM entegrasyonundan faydalanabilir. Böylece iç ortam soğutma

gereksinimlerini azaltabilir. Bina yöneliminin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi, PCM sistemlerinin genel performansını artırabilir ve daha tutarlı enerji tasarrufları sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Alassaad, K.; Minto, J.; de Wilde, P. Enhancing Building Thermal Performance: A Review of Phase Change Material Integration. *Energies* 2025, 18, 3200. <https://doi.org/10.3390/en18123200>.
- [2] Dardouri, S.; Tuncbilek, E.; Khaldi, O.; Arıcı, M.; Sghaier, J. Optimizing PCM Integrated Wall and Roof for Energy Saving in Building under Various Climatic Conditions of Mediterranean Region. *Buildings* 2023, 13, 806.
- [3] Lagou, A.; Kylili, A.; Šadauskiene, J.; Fokaides, P.A. Numerical investigation of phase change materials (PCM) optimal melting properties and position in building elements under diverse conditions. *Constr. Build. Mater.* 2019, 225, 452–464.
- [4] Li, Z.X.; Al-Rashed, A.A.A.A.; Rostamzadeh, M.; Kalbasi, R.; Shahsavar, A.; Afrand, M. Heat transfer reduction in buildings by embedding phase change material in multi-layer walls: Effects of repositioning, thermophysical properties and thickness of PCM. *Energy Convers. Manag.* 2019, 195, 43–56.
- [5] Li, M.; Cao, Q.; Pan, H.; Wang, X.; Lin, Z. Effect of melting point on thermodynamics of thin PCM reinforced residential frame walls in different climate zones. *Appl. Therm. Eng.* 2021, 188, 116615.
- [6] Nizovtsev, M.I.; Sterlyagov, A.N. Effect of phase change material (PCM) on thermal inertia of walls in lightweight buildings. *J. Build. Eng.* 2024, 82, 107912.
- [7] Terhan, M.; Ilgar, G. Investigation of used PCM-integrated into building exterior walls for energy savings and optimization of PCMmelting temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2023, 369, 130601.
- [8] Wang, Q.; Wu, R.; Wu, Y.; Zhao, C.Y. Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction. *Energy Build.* 2018, 172, 328–336.
- [9] Zhang, Q.; Yang, Z.; Wang, G. Numerical and experimental investigation on dynamic thermal performance of floor heating system with phase change material for thermal storage. *Indoor Built Environ.* 2021, 30, 621–634.
- [10] Zhou, S.; Song, M.; Shan, K.; Razaqpur, A.G.; Huang, J.J. Effects of the position and melting point of the PCM layer on the comprehensive thermal performance of a Trombe wall under mixed dry climate. *Energy Build.* 2024, 307, 113932.

TARIMSAL YAPILARIN İKLİMLENDİRİLMESİNDE ISI POMPASI KULLANIMI

Prof.Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

Çukurova Üniversitesi, hhozturk@cu.edu.tr- ORCID ID: 0000-0001-6904-5539

Arş. Gör. Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM

Iğdır Üniversitesi, kaan.kucukerdem@igdir.edu.tr- ORCID ID: 0000-0002-1593-4725

Dr. Öğr. Üyesi Ümran ATAY

Mardin Artuklu Üniversitesi, umranatay@artuklu.edu.tr - ORCID ID: 0000-0002-2248-4582

ÖZET

Düşük karbonlu iklimlendirme sistemlerine geçiş, özellikle küresel sera gazı (GHG) emisyonlarının önemli bir oranını oluşturan inşaat sektöründe iklim nötrlüğüne ulaşmak için temel öneme sahiptir. Çeşitli iklimlendirme teknolojiler arasında ısı pompaları (HP), yüksek enerji verimlilikleri ve özellikle yenilenebilir elektrikle çalıştırıldıklarında karbondioksit (CO₂) emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyelleri nedeniyle önemli bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, hava kaynaklı (ASHP), toprak kaynaklı (GSHP) ve su kaynaklı (WSHP) ısı pompalarının teknik performans ve çevresel etkilerini değerlendirmek için güncel literatürden elde edilen bulgular incelenmektedir. Ayrıca yaşam döngüsü GHG emisyonları, coğrafi enerji karışımı çeşitliliğinin etkisi ve ısı pompalarının hibrit ve bölgesel ısıtma sistemlerine entegrasyonu da tartışılmaktadır. Hibrit HP sistemlerinde en düşük özgül GHG salımı gerçekleşir. Bu değer, verilen ısı enerjisinin kWh'ı başına ortalama olarak 0,108 kgCO₂-eq düzeyindedir. HP sistemleri, teknoloji türüne ve enerji karışımına bağlı olarak %90 oranına ulaşan potansiyel GHG salımı azaltma potansiyeline sahiptir. Yüksek yatırım maliyetlerine rağmen, GSHP ve WSHP'lerin daha düşük çevresel ayak izi (FP), daha kararlı ısıl girdi ve daha yüksek sezonluk performans katsayısından (SCOP) kaynaklanan daha iyi performansları nedeniyle bina sektörünün karbonsuzlaştırılması için bu teknolojileri cazip seçenekler haline getirmektedir. Isı pompalarının ısı depolama, yenilenebilir enerji ve akıllı kontrol teknolojileriyle entegrasyonu, pazar potansiyellerinin karşı karşıya olduğu zorluklara rağmen verimliliklerini ve iklimsel faydalarını daha da artırmaktadır. Özellikle hibrit tasarımlardaki ısı pompaları, sürdürülebilir bina ısı temini ve enerji dönüşümü için temel bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Faydalarına rağmen, ısı pompalarının yaygın olarak benimsenmesi, yüksek ilk yatırım maliyetleri, eski binalarda iyileştirme zorlukları ve şebeke kapasitesi sınırlamaları gibi teknik ve ekonomik engellerle karşı karşıyadır. HP teknolojisinin yaygın olarak kullanılmasını hızlandırmak için sübvansiyonlar, performans standartları ve altyapı yatırımları yoluyla politika desteği gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: : Tarımsal yapılar, İklimlendirme, Isı pompası

1. GİRİŞ

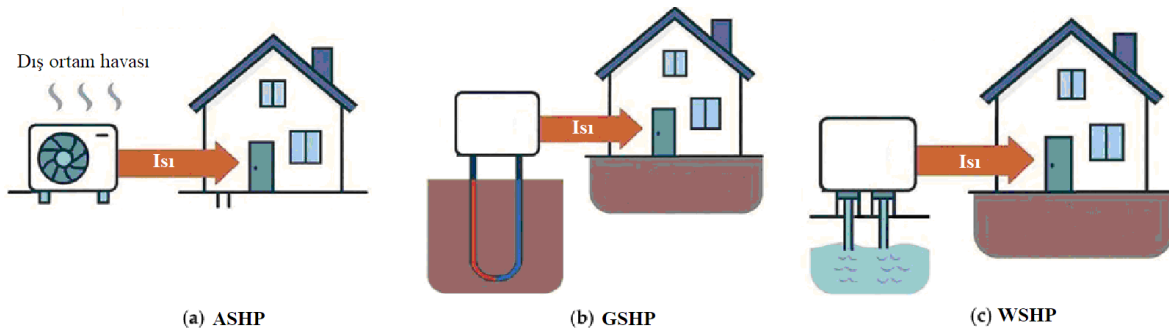
Sürdürülebilir ısıtma çözümlerine geçiş, özellikle ısıtmanın enerji tüketimi ve sera gazı (GHG) emisyonlarının önemli bir payını oluşturduğu inşaat sektöründe, küresel

karbonsuzlaştırma çabalarının önemli bir parçasıdır. Isı pompaları, enerji verimliliğini korurken karbon emisyonlarını azaltmak için birincil bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Isı pompaları, havadan, topraktan veya su kaynaklarından ısı enerjisini aktararak, fosil yakıtlara dayalı geleneksel ısıtma yöntemlerine oldukça verimli bir alternatif sunar.

Isı pompalarının çalışma ilkesi, serbest veya atık enerjinin kapalı devre bir işlemle daha yüksek sıcaklıktaki ısıya dönüştürülmesi sürecine dayanır. Ters *Carnot* çevriminde çalışan bu pompalar, düşük sıcaklıktaki ısıyı kullanır, daha yüksek bir sıcaklığa yükseltir ve binanın her yerine dağıtır. Piyasada, çalışma ilkeleri, ısı kaynakları, uygulamaları veya ölçekleri bakımından farklılık gösteren çeşitli ısı pompası türleri mevcuttur.

Isı pompaları genellikle ısı kaynaklarına göre sınıflandırılır (Görsel 1):

- *Hava kaynaklı ısı pompaları* (ASHP): Isıyı ısı kaynağı olarak ortam havasından alır ve ısıyı doğrudan havadan (havadan→havaya) veya hidrolik sistemler (havadan→suya) aracılığıyla iletir.
- *Toprak kaynaklı ısı pompaları* (GSHP): Isıyı topraktan çeker; enerji toprak ısı değiştiricileri veya sondajlı ısı değiştiricileri aracılığıyla kullanır.
- *Su kaynaklı ısı pompaları* (WSHP): Isıyı sudan çeker. Açık veya kapalı devre sistemler aracılığıyla kuyular, akarsular, göller ve göletler gibi yerel su kaynaklarını kullanır.



Görsel 1. Isı Kaynağına Bağlı Olarak Isı Pompası Türleri

Isı pompalarının kullanımıyla ilgili en önemli teknik faktörler Çizelge 1’de verilmektedir. Çizelge 1’deki teknik değişkenlerin nicel karşılaştırması, ısı pompası tipleri arasında farklı çalışma özelliklerini ortaya koymaktadır. Toprak kaynaklı (GSHP) ve su kaynaklı (WSHP) ısı pompaları genellikle daha yüksek besleme sıcaklığı sınırları (70 °C’ye kadar) sunarak geleneksel radyatör sistemleriyle uyumluluk sağlarken, hava kaynaklı üniteler (ASHP) genellikle 65 °C’ye kadar ulaşır. Isı pompalarının performansını etkileyen teknik konular, ısı kaynağı tipine bağlı sıcaklık kararlılığı temelinde değerlendirilebilir. Bu bağlamda, ASHP çok çeşitli dış hava koşullarında (-20 ile +35 °C) çalışır. Bu durum mevsimsel performansı önemli ölçüde etkileyebilir. Buna karşılık, GSHP ve WSHP sırasıyla, -10 ile +25 °C ve +5 ile +25 °C arasında değişen daha kararlı yeraltı veya su kaynağı sıcaklıklarından faydalanır.

Bu ısıl üstünlükler, mevsimsel performansın iyileştirilmesine katkıda bulunur. Mevsimlik performans katsayısı (SCOP) değerlerinde görüldüğü gibi, GSHP en yüksek mevsimsel verimliliğe (5,0’a kadar) ulaşırken, bunu WSHP (4,5’e kadar) ve ASHP (genellikle 2,8 ile 3,5 arasında) izlemektedir. Bu farklılıklar, daha kararlı ve ılımlı kaynak sıcaklıklarına sahip sistemlerin (GSHP ve WSHP) yıl boyunca daha iyi enerji verimliliği sağlama eğiliminde

olduğunu ve daha soğuk iklimler veya yüksek sıcaklıklı ısıtma talepleri için daha uygun olduğunu doğrulamaktadır.

Çizelge 1. Isı Pompası Performansının Teknik Yönleri (Zelazna ve Pawłowski, 2025)

Ölçütler	Hava Kaynaklı Isı Pompası (ASHP)	Toprak Kaynaklı Isı Pompası (GSHP)	Su Kaynaklı Isı Pompası (WSHP)
Sıcaklık kararlılığı	Değişken - hava koşullarından büyük ölçüde etkilenir	Son derece kararlı - yer altı sıcaklıkları sabit kalır	Yüksek kararlılık - yeraltı suyu
Isıtma durumunda COP aralığı	~2,0–4,5	~3,5–6,5	Orta kararlılık - yüzey suyu
Ortam koşullarına duyarlılık	Yüksek	Düşük	~3–6
Kurulum maliyeti	Genellikle daha düşük; ılıman iklimlerde tercih edilir	Kirli zemin sisteminin kurulumu (delme/kazı) nedeniyle daha yüksek	Kullanılan su türüne bağlı olarak düşük ile orta
Besleme sıcaklığı [°C]	65'e kadar	70'e kadar	Genellikle GSHP'lere benzer veya daha yüksek, maliyeti etkileyen belirli saha koşulları
Çalışma sıcaklığı [°C]	-20 ile +35	-10 ile +25	70'e kadar
Ses seviyesi [dB(A)]	<68	<55	+5 ile +25
Yatırım maliyeti [€/kW]	>700	>1100	<552

Yeraltı (veya yeraltı suyu) sıcaklıkları kısmen sabit ve kış havasından daha sıcak kaldığından, GSHP mevsim boyunca neredeyse sabit COP değerlerinde çalışabilir. Bu nedenle ortam koşullarına duyarlılıkları düşük kalır. Bu durum, Avustralya, Perth'te aynı evlerde açık devre GSHP ile ASHP'ini karşılaştıran durum çalışmasının sonuçlarında belirtilmektedir. Sonuçlar, GSHP'nin ısıtma durumunda COP değerinin ortalama ~3,9 olduğunu ve dış ortam sıcaklığından esasen etkilenmediğini, ASHP'nin ısıtma COP değerinin ise ortam koşullarına bağlı olarak 1,9 ile 2,9 arasında değiştiğini göstermiştir (Aprianti ve Ark., 201). Hava kaynaklı ısı pompaları, dış hava sıcaklıkları büyük ölçüde dalgalandığı ve kışın azaldığı için daha düşük ve daha değişken mevsimsel ısıtma verimliliğine sahiptir. Ilıman iklimlerde, modern ASHP'ler iyi tasarlanmışlarsa yeterli SCOP ile performans gösterebilirler. Rossi di Schio ve Ark. (2021) tarafından İtalya'da yapılan bir çalışmada, ılıman bir kıyı şehrindeki (S. Benedetto) bir ASHP'nin yaklaşık 2,86–2,99 aralığında bir etkin SCOP değerine sahip olduğunu, soğuk bir dağ ikliminde (Livigno) ise aynı ASHP'nin SCOP değerinin yaklaşık 2,72–2,83 aralığına azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, buzu temizlemek için gereken defrost döngüleri, ASHP'nin mevsimsel COP değerini önemli ölçüde azaltmıştır. SCOP, belirtilen ilk konumda yaklaşık 2,93 iken, defrostlar ihmal edildiğinde 3,09'a yükselmiştir. Bu durum defrost enerjisi ihtiyaçları nedeniyle yaklaşık %5 oranında bir azalmaya neden olmuştur.

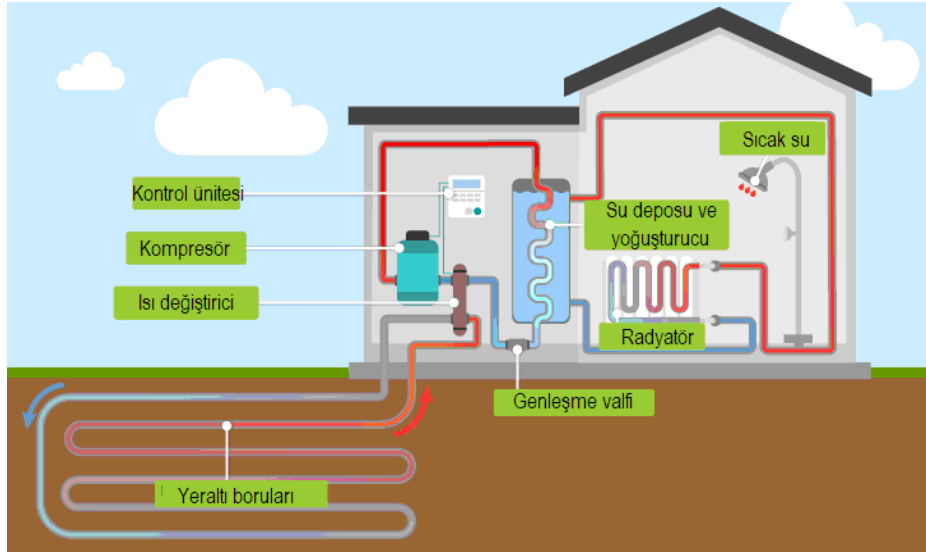
2. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI

2.1. Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Faydaları

Toprak kaynaklı bir ısı pompası (GSHP) (Görsel 2) kullanmanın başlıca faydalarından bazıları şunlardır:

- ✓ Düşük karbon emisyonu, karbon ayak izinizi azaltmaya yardımcı olur.

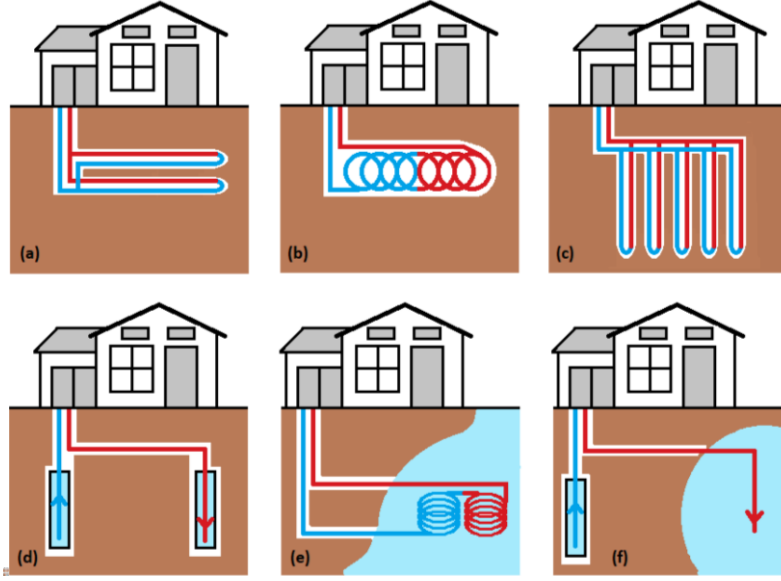
- ✓ Isı pompası çeşitli doğal kaynaklardan güneş enerjisini soğurduğu için ücretsiz bir ısı kaynağı olan topraktan yararlanır.
- ✓ Verimleri yüksektir.
- ✓ Petrol veya LPG'ye kıyasla, ısıtma faturalarından önemli ölçüde (%30 ile %50 arasında) tasarruf sağlanabilir.
- ✓ Hükümetler tarafından teşvik edilen yenilenebilir bir ısıtma seçeneğidir.
- ✓ Çok fazla bakım veya servis gerektirmeyen pratik bir uygulamadır.
- ✓ İşletme maliyetleri düşüktür.
- ✓ Yakıt fiyat değişikliklerine veya enerji güvenliği tehditlerine duyarlı değildir.
- ✓ Yakıt kullanıldığında olduğu gibi yangın riski olmadığından güvenli bir seçenektir.
- ✓ Gürültü seviyeleri düşüktür.
- ✓ Verimliliği daha da artırmak ve maliyetleri azaltmak için diğer yenilenebilir teknolojilerle birlikte kullanılabilir.



Görsel 2. Toprak Kaynaklı Isı Pompasının (GSHP) Başlıca Bileşenleri

2.2. Zemin Isı Değiştirici Tasarımları

GSHP için ısı değiştiriciler; kapalı yatay devre, kapalı slinky devre, kapalı dikey devre, açık kuyu devresi, kapalı su devresi ve açık devre kuyu ve yüzey gövdesi gibi farklı tasarımlarda düzenlenmektedir (Görsel 3).

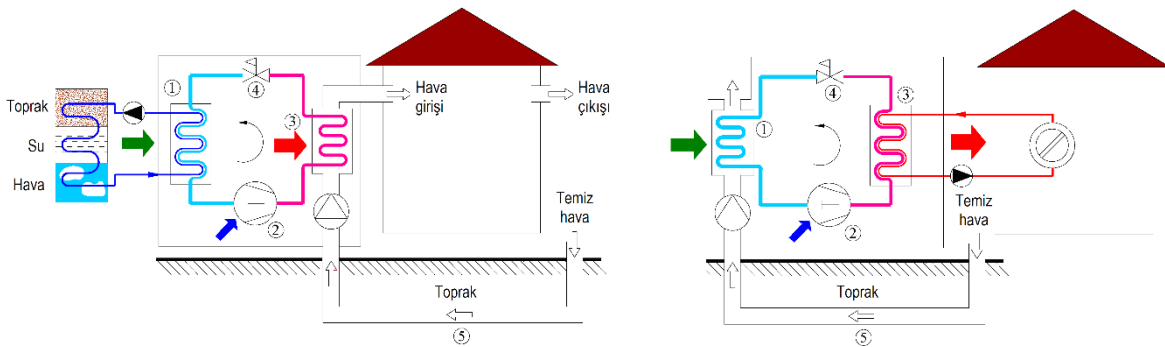


Görsel 3. Toprak Kaynaklı Isı Pompaları (GSHP) İçin Farklı Isı Değiştirici Düzenlemeleri: (A) Kapalı Yatay Devre, (B) Kapalı Slinky Devre, (C) Kapalı Dikey Devre, (D) Açık Kuyu Devresi, (E) Kapalı Su Devresi Ve (F) Açık Devre Kuyu Ve Yüzey Gövdesi

2.2.1. Yatay Isı Değiştirici Tasarımları

Yatay tasarımlar, havadan toprağa ısı değiştiricilerde ve ısı pompası sistemine bağlı yatay zemin ısı değiştiricilerinde zemin ısı enerjisinin doğrudan kullanımını içerir. Her iki sistem türü de, performansın mevsimsel toprak sıcaklığı ve nem içeriğindeki değişikliklerden etkilendiği yüzey toprak katmanlarına kurulur. Yerel jeolojik koşullar, özellikle zemin ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi, yeraltındaki ısı transferini etkiler.

Topraktan havaya ısı ısı değiştiriciler, yenilenebilir yeraltı enerjisinin kullanımı dikkate alındığında en basit ısı değiştirici tasarımıdır. Genellikle EAHE, GAHE veya HAGHE olarak kısaltılırlar. Burada ek H harfi yatay kurulumu belirtir. Açık sistem tasarımında, ortam havası zemine yerleştirilmiş borulardan geçer ve zeminle ısı transferi yapar. Mevsime bağlı olarak hava, havalandırma sistemi aracılığıyla dağıtılmadan veya bir hava kaynaklı ısı pompası (ASHP) için ısı kaynağı olarak kullanılmadan önce ısıtılır veya soğutulur (Görsel 4). EAHE, duvarların içi boş prefabrik yapı bileşenleri olarak inşa edildiği veya boruların duvarların içine yerleştirildiği ısılar olarak aktive edilen bina sistemlerinin (TABS) bir parçası olarak da kullanılabilir. Bu tür sistemlerde, kapalı devre bir yapılandırma kullanılabilir.



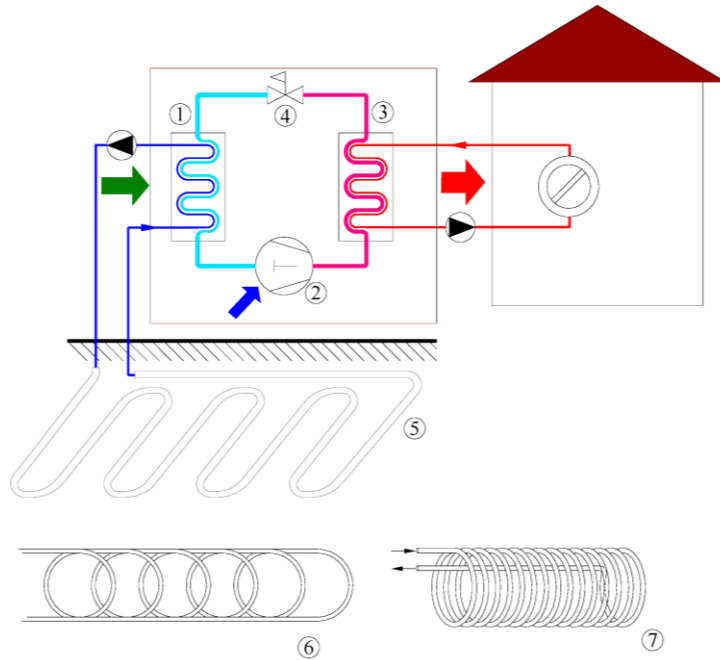
Görsel 4. Havalandırma Sisteminde Hava Beslemesi İçin Kullanılan Toprak-Hava Isı Değiştiricisi (Sol) Ve Hava Kaynaklı Isı Pompasına (ASHP) (Sağ) Bağlanmıştır: (1-

Buharlaştırıcı, 2-Kompresör, 3-Yoğuşturucu, 4-Genleşme Vanası, 5-Topraktan Havaya Isı Değiştiricisi) (Boban Ve Ark., 2021)

Yatay zemin ısı değiştiriciler, kapalı bir sistem olarak kullanılır ve ısı pompasına bağlanır. Toprak, boruların içindeki çalışma akışkanıyla ısı enerjisi transfer yapar. 1-2 m derinliğindeki hendeklere kuruldukları için performansları dikey GSHP sistemlerine kıyasla daha düşüktür. Yatay sistem için gereken kurulum alanı daha büyüktür, ancak kurulum maliyetleri dikey ısı değiştiricilere kıyasla daha düşüktür. Boru döngüsü geometrisine bağlı olarak, yatay sistemler doğrusal döngü, spiral bobin ve slinky bobin tasarımlarına ve döngü bağlantılarına bağlı olarak sistem hendek, seri ve paralel tasarımlara ayrılabilir (Görsel 5). Dikey tasarımlara kıyasla, bobin tasarımları daha uzun borular ve uzun süre pompa çalışması gerektirir. Böylece, mevcut zeminin daha verimli kullanılmasını sağlar.

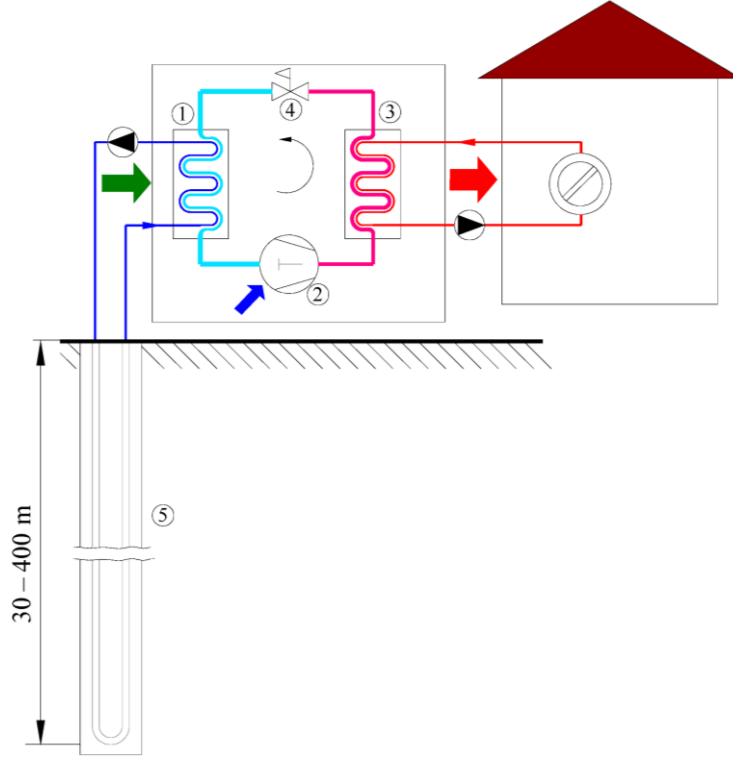
2.2.2. Dikey Isı Değiştirici Tasarımları

Belirtildiği gibi, yeterli zemin alanı mevcut olduğunda, yatay GSHP en uygun maliyetli seçenektir. Ancak, mevcut alan sınırlıysa, zemin yüzeyi kayalıksa ve manzarayla görsel bir etkileşim hoş karşılanmıyorsa, dikey GSHP uygulanır. Dikey zemin ısı değiştiriciler (VGHE), sondaj borusu ısı değiştiricileri (BHE) olarak da adlandırılır. Yatay GSHP'na kıyasla, BHE daha yüksek kurulum maliyetlerine ve daha istikrarlı performansa sahiptir. Çünkü ortam havasından ciddi şekilde etkilenmezler.



Görsel 5. Isı Pompasına Bağlı Yatay Isı Değiştirici: 1-Buharlaştırıcı, 2-Kompresör, 3-Yoğuşturucu, 4-Genleşme Valfi, 5-Doğrusal Döngü, 6-Slinky Serpantin, 7-Spiral Serpantin (Boban Ve Ark., 2021)

Dikey GSHP, sondaj kuyusunun derinliğine ve dolayısıyla ısı değiştirici tipine bağlı olarak iki gruba ayrılır. İlk grup, sığ sondaj kuyuları GHE (<400 m), genellikle ısı pompalarıyla (toprak bağlantılı ısı pompaları-GCHP) ısı enerjisi kaynağı veya soğurucu olarak birlikte kullanılır (Görsel 6).



Görsel 6. Isı Pompasına Bağlı Dikey Sondaj Kuyusu Isı Değiştiricisi: 1-Buharlaştırıcı, 2-Kompresör, 3-Yoğuşturucu, 4-Genleşme Vanası, 5-Sondaj Kuyusu Isı Değiştirici (Boban ve Ark., 2021)

Geleneksel bir tasarım, genellikle yaklaşık 100–200 mm çapında bir sondaj kuyusundan oluşur ve çalışma akışkanının dolaşması için 19–38 mm aralığında bir çapa sahip U boruları bulunur. En yaygın tek U boru tasarımının yanı sıra, kullanılabilen diğer tasarımlar çift veya üçlü U boru, W şekilli boru, koaksiyel boru ve helezon şekilli borudur. Sondaj kuyusunun kesitine, borular ve zemin arasındaki ısı direnci azaltan ve malzemeler arasında iyi temas sağlayan harç adı verilen çeşitli dolgu malzemeler doldurulur. Bu tür sistemlerin ısı transfer alanı sınırlı olduğundan, sonuç olarak bu sistemlerin ısı kapasitesi (ısı gücü) de sınırlıdır. Bu tür sistemlerin daha yüksek bir ısı kapasiteye ulaşması için; 1) sondaj kuyusu sayısını artırmak (günümüzdeki tesislerin çoğu) veya 2) sondaj kuyusu derinliğini artırmak olmak üzere iki olası çözüm vardır. Sondaj kuyusu sayısını artırmak, sadece yeterli alan mevcut olduğunda mümkündür.

Zemin ısı değiştiricisi (GHE) ısı kapasitesini artırmak için ikinci seçenek, aynı zamanda dikey BHE'nin ikinci kategorisi olarak da sınıflandırılabilen, derin sondaj kuyusu ısı değiştiricileri (DBHE) teknolojisini kullanır. DBHE, yüksek sıcaklıklarda orta-derin jeotermal enerji elde edebilir. Derin sondaj kuyusu ısı değiştiriciler (DBHE), elde edilen ısı doğrudan (ısı pompası yardımı olmadan) kullanılabilme olasılığının olduğu sistemlerdir. DBHE teknolojisi kullanıldığında, klasik U-borulu tasarımlar genellikle daha geniş bir ısı transfer alanına sahip ve daha yüksek akış hızını (daha düşük pompalama maliyetleri) sürdürebilen koaksiyel (boru içinde boru) sondaj kuyusu ısı değiştiricileri ile değiştirilir. Jeotermal projenin toplam maliyetinin %50'sinden fazlası sondaj maliyetleri olabileceğinden, yüksek sondaj maliyetlerini azaltmak için iyi bir çözüm, son zamanlarda kapsamlı bir şekilde araştırılan tükenmiş ve terk edilmiş gaz ve petrol kuyularının kullanılmasıdır. DBHE'de ulaşılan sıcaklığa

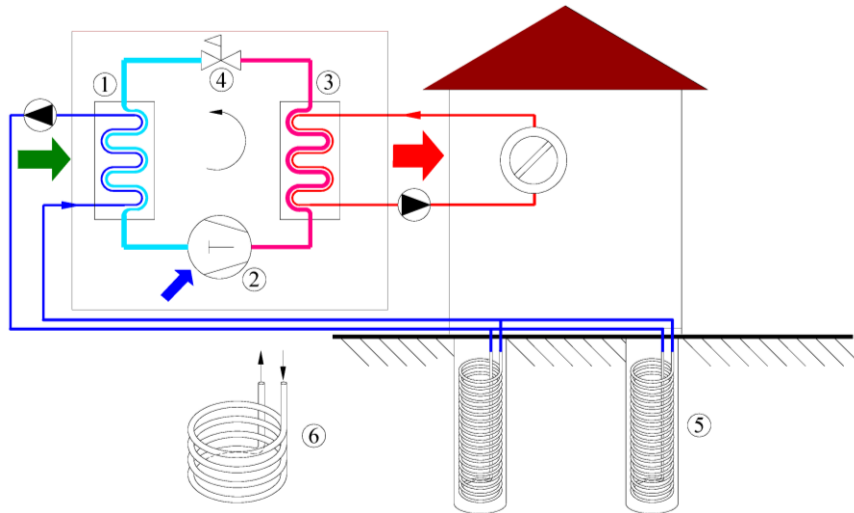
bağlı olarak, bu sistemler doğrudan alan ısıtması, ısı pompalarıyla birlikte veya hatta güç üretim sistemlerinde kullanılabilir.

2.2.3. Sığ Isı Değiştirici Tasarımları

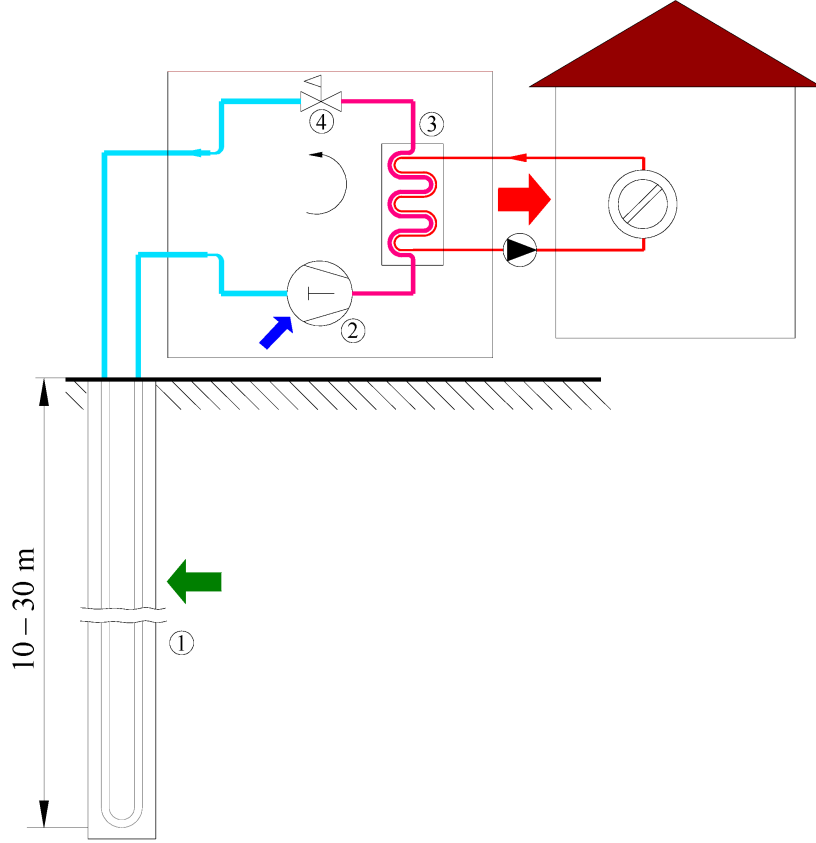
En yaygın GSHP tasarımları arasında yatay ve dikey tasarımlar yer alır. İlki düşük kurulum maliyetlerine, ikincisi ise zemin sıcaklığı kararlılığı nedeniyle üstün ısıl performansa sahiptir. Bu arada, sığ sistemler her iki sistemin avantajlarına da sahiptir. Daha az masraflı kazı çalışmaları ve yüzey koşullarının etkisinin sönümlendiği zemin katmanlarının kullanımı üstünlükleri vardır. Bu GHE düzeninin uygulanması, artan zemin sıcaklığı ve sınırlı kurulum alanı olan kentsel ortamlarda veya akiferlerin bozulmasını önlemek için derin sondajın yasak olduğu yerlerde ilgi çekicidir. Sığ sistemler, ısı transfer alanını artırmak için büyük çaplı, konik veya helezon şekilli tasarımlar veya bina kazıklarına (enerji kazıkları) gömülü borular içerir (Görsel 7).

2.2.4. Doğrudan Genleşmeli Sistemler

Doğrudan genleşme (DX) sistemlerinin kullanılması için toprak sıcaklık profilleri ve ısı özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu özelliklerin gelişmiş kontrol sistemleriyle iş birliği içinde modellenmesi ve bazı tasarım zorluklarının üstesinden gelinmesi, doğrudan genleşme (DX) sistemlerinin kullanımı için bir ön koşuldur. Daha önce belirtilen, genellikle dolaylı ısı pompası ikincil devresi olarak kullanılan su veya glikol karışımı ısı değiştiriciler ile karşılaştırıldığında, DX sistemleri, çalışma akışkanı ısı pompası soğutucu akışkanı olan bir ısı pompasının buharlaştırıcıları veya yoğuşurucuları olarak işlev görür (Görsel 8). Bu kurulum, akışkan halkaları arasında bir ısı değiştiriciye ve bir sirkülasyon pompasına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Soğutucu akışkanın DX'ine sahip bir yer ısı değiştirici tasarımı, soğutucu akışkan türü, soğutucu akışkan şarjı, kompresöre yağ dönüşü, dikey sondaj kuyusu ısı değiştiricinin derinliği ve soğutucu akışkan sızıntısından kaynaklanan olası toprak kirliliği ile ilgili bazı özel kurallara uymalıdır. Zemin ısı değiştirici yatay, dikey veya eğimli bir şekilde yerleştirilebilir. Dikey tasarımlı ısı değiştiriciler yaygın olarak kullanılır.



Görsel 7. Isı Pompasına Bağlı Sığ Isı Değiştirici: 1-Buharlaştırıcı, 2-Kompresör, 3-Yoğuşurucu, 4-Genleşme Valfi, 5-Enerji Kazıkları, 6-Büyük Çaplı Serpantin GHE)
(Boban Ve Ark., 2021)



Görsel 8. Doğrudan Genleşmeli Sondaj Kuyusu Isı Değiştiricisi: 1-Buharlaştırıcı/BHE, 2-Kompresör, 3-Yoğusturucu, 4-Genleşme Valfi (Boban Ve Ark., 2021)

3. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Jeotermal enerji, küresel enerji sürdürülebilirliği ve çevre korumasını sağlamada alternatif bir enerji kaynağı olarak büyük potansiyele sahip, yaygın olarak bulunan ve sürekliliği olan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Binaların ısıtılması veya soğutulması söz konusu olduğunda, verimli sistem performansı için en önemli bileşen bir zemin ısı değiştiricidir (GHE). Kurulum türüne göre yatay, dikey, sıg ve DX sistemleri olmak üzere çeşitli GHE seçenekleri mevcuttur. GHE'lerin incelenmesinde en yaygın çalışma türü sayısal simülasyonlardır. Sayısal simülasyonları, sayısal ve deneysel oranının GHE sisteminin uygulama basitliği ve maliyetiyle yakın ilişki içinde olduğu saha ve laboratuvar deneyleri ve analitik çalışmalar izler. Sayısal çalışmalar çoğunlukla GHE'nin durağan veya yarı-geçiş koşullarındaki performansını inceler. Dinamik veya geçiş simülasyonu yapıldığında ek sonuçlar çıkarılabilir. Örneğin, yatay GHE sistemlerindeki boru malzemesinin durağan koşullara bağlı olarak ısı performans üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi varken, çalışmalar boru malzemesinin toprak ısı doygunluğu üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çoğu çalışmanın sadece GHE ısı performansını araştırdığı ve ısı performans ile pompa/fan gücünün akışkan hızı, boru çapı, boru uzunluğu, boru pürüzlülüğü vb. faktörlerden farklı şekilde etkilenmesi nedeniyle sonuçların yanıltıcı olabileceği de belirtilmektedir. GHE ortak bileşenleri, çalışma akışkanları, borular (boyutlar, malzemeler ve düzenlemeler) ve dolgu ve enjeksiyon malzemeleridir. Bunlar aynı zamanda daha iyi ısı performans sağlamak için iyileştirilebilecek değişkenlerdir. GHE ısı performansının iyileştirilmesi, etkili faktörler değerlendirilerek yapılabilir. Ancak bazı sınırlamalar dikkate alınmalıdır. En önemli sınırlamalardan biri, malzemenin bulunabilirliği ve

fiyatıdır. Çünkü maliyet ekonomik açıdan haklı çıkarılamıyorsa, kullanımın bir anlamı yoktur. Çevresel etki, dayanıklılık ve uygulanabilirlik gibi diğer sınırlamalar da dikkate alınmalıdır.

Dolgu harcının ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi, topraktan çalışma akışkanına ısı transferini artırır. İyi ısı iletkenliğin yanı sıra, enjeksiyon harcı düşük geçirgenliğe ve kendi kendini kapatma için uygun özelliklere sahip olmalı ve BHE'nin mekanik kararlılığını sağlamalıdır. Diğer taraftan, enjeksiyon harcı iyileştirmesi dikkatli ve ekonomik bir şekilde yapılmalıdır. Malzeme maliyetini analize dahil etmek çok önemlidir. Çünkü ısı iletkenliği iyileştirmek daha yüksek sermaye maliyetine neden olabilir ve GHE'nin ısı performansı sınırsız bir şekilde iyileştirilemez. Harç iyileştirmesi, ısı performans üzerinde asimptotik bir etki gösterir ve bazı durumlarda U-borulu BHE'deki ısı kısa devre nedeniyle performansı azaltabilir. Son yıllarda yapılan çalışmaların çoğu, geleneksel bentonit ve çimento karışımlarına kıyasla modern PCM malzemelerine odaklanmıştır. Gizli ısı depolama için kullanılan PCM, halka ve çevresindeki toprak sıcaklığı dalgalanmalarını azaltarak GHE performansını olumlu yönde etkiler.

Çalışma akışkanlarına gelince, doğrudan genleşme sistemlerindeki soğutucu akışkanlar, dolaylı sistemlerdeki çalışma akışkanlarına göre daha iyi ısı performans gösterir. Geleneksel olarak, dolaylı sistemlerde, yüksek ısı özellikleri, ihmal edilebilir çevresel etkisi ve düşük fiyatı nedeniyle su tercih edilen GHE çalışma akışkanıdır. Düşük sıcaklıklarda çalışma akışkanının donmaması gerekir. Bu nedenle su genellikle glikol karışımlarıyla değiştirilir (karıştırılır). Yeni çalışmaların çoğu, baz akışkandaki nanopartiküllerin bir kombinasyonu olan nanoakışkanlara odaklanmıştır. %0,1 kütle gibi çok düşük konsantrasyonlarda gelişmiş ısı özellikler gösterirler ve %1 kütleden fazla konsantrasyonlarda nadiren kullanılırlar. Nanoakışkanlar ısı performans açısından büyük bir potansiyele sahip olmalarına rağmen, olumsuz yönleri (daha fazla basınç düşüşü, daha yüksek fiyat ve sızıntı nedeniyle nanoakışkan kaybı) yaygın kullanım alanını sınırlar.

GHE boruları kimyasal olarak kararlı (doğrudan genleşme sistemleri için bakır borular), korozyona dayanıklı ve iyi ısı iletkenliğine sahip, kullanımı kolay olmalıdır. GHE derinliğinin ve ısı değişim alanının iyileştirilmesi, GHE kararlılığını ve performansını artırır. Ancak aynı zamanda sermaye ve işletme maliyetlerini artırır ve zeminin uzun süreli kararlılığı sorusunu gündeme getirir. Borularda yapısal iyileştirmeler yapılırken, genellikle önemli sınırlamalar getirebilen hidrolik ve basınç özelliklerinin analiz edilmesi önemlidir. Doğru boru malzemesini seçmek, GHE performansını artırabilir ve kurulum maliyetlerini azaltabilir. Isı edeğiştiricinin türüne bağlı olarak, boru malzemesinin ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi GHE performansını artırabilir veya performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olmayıp sadece yatırım maliyetini artırır.

Yatay GHE sistemlerinin tasarımına gelince, borular arasında daha fazla boşluk, gelişmiş çok borulu tasarımlar veya spiral tasarım, ikincil kaplama toprağı ve nem tutma, GHE'nin ısı performansını iyileştirir. Kurulum derinliği, sadece zemin özelliklerinde önemli bir fark varsa etkili bir değişkendir. Mevsimsel sıcaklık değişimleri, sık topraktaki GHE performansını önemli ölçüde etkilemez. Enerji kazıkları ve sepet tasarımları da dahil olmak üzere sık GHE sistemleri, daha kararlı yeraltı koşulları ve dikey tasarımlara göre daha uygun maliyetli kurulumları nedeniyle giderek daha popüler hale gelmektedir. Bobin tasarımları daha

büyük bir basınç düşüşüne sahiptir, ancak bu, daha büyük iç boru çapı ve spiral tasarımlı bir bobin çapı ile telafi edilebilir. Helis eğiminin etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Dikey GHE sistemleriyle ilgili yeni gelişmeler, ısıl performansı iyileştirmek ve sondaj deliğini azaltmak için çeşitli yeni geometriler ve kanatçıklar kullanarak klasik U-boru düzenlemelerini daha da iyileştirmeye çalışmakta ve böylece yüksek sondaj maliyetlerini azaltarak GSHP teknolojisini ticari olarak daha da erişilebilir hale getirebilmektedir. Derin sondaj borusu ısı değiştiricilerin kısmen yeni uygulaması, sığ BHE'den daha iyi performans sundukları için büyük bir potansiyel göstermiştir. Akışkan akış hızının, akışkan giriş sıcaklığının doğru seçilmesi, iç borunun yalıtımının artırılması ve dış borunun zemine yakın yalıtılması, sondaj borusunun derinliğinin artırılması ve çap oranının doğru seçilmesi, DBHE'nin daha iyi ve daha verimli bir performans göstermesinin anahtarıdır. Yüksek sondaj maliyetlerinden kaçınmak için, terk edilmiş ve tükenmiş petrol ve gaz kuyularının yeniden canlandırılması önerilmektedir.

Doğrudan genleşmeli sistemlerin kullanımı, dolaylı tasarımlara kıyasla sınırlıdır. Ancak enerji verimliliği performansları geleneksel ısı pompası sistemlerinden daha iyidir. Bilimsel literatürde, DX sistemlerinin gerekçeleri ayrıntılı olarak araştırılmamıştır. Soğutucu akışkan şarjı, ikincil sistemlere kıyasla çok daha yüksektir. Olası soğutucu akışkan sızıntısı ve zemindeki yağ kirliliği ciddi ekolojik sorunlardır. Önerilen soğutucu akışkan hızına ulaşmak için BHE boyut seçimi, kompresöre yağ dönüşünü, kompresörün kısmi işini ve doğrudan genleşmeli BHE'lerin paralel bağlantısı için soğutucu akışkan akış dağılımını garanti altına alır ve doğrudan genleşme sistemlerinin yaygın kullanımından önce çözüm gerektiren zorluklardan sadece birkaçıdır.

Farklı GHE tasarımlarının ısıl performansını iyileştirmenin farklı yöntemleri vardır. Yine de, pratik nedenlerden dolayı (mevcut ticari ürünler, boyutlandırma güvenilirliği vb.) malzeme, boru çapları ve çalışma akışkanları açısından ortak tasarımlar baskındır. Yeni bir tasarım önerildiğinde değerlendirilmesi gereken önemli bir konu, bu tasarımın yaygın olarak kullanılan boyutlandırma ve bina simülasyon araçlarına uygulanabilirliğidir. Günümüzde, sadece geleneksel dikey sondajlı ısı değiştiriciler için ticari olarak mevcut araçlar ayrıntılı olarak karşılaştırılmakta ve analiz edilmektedir. Daha ileri araştırmaların bir diğer alanı da, yerinde yeraltı ısı özellikleri ve bina yükleriyle güçlü bir şekilde bağlantılı olan GHE sistemlerinin operasyonel değişkenleri ve optimum kontrolüdür. GHE tasarımının sadece ısıl performansa dayalı olarak karşılaştırılması, özellikle GHE ısı pompası sistemine bağlıysa yanıltıcı olabilir. GHE tasarımının daha fazla iyileştirilmesi için, yatırım ve işletme maliyetlerinin yanı sıra işletme değişkenlerinin etkisini de içeren yeni araştırmalar yapılmalıdır.

Üstünlüklerine rağmen, ısı pompalarının yaygın olarak benimsenmesi, yüksek ilk yatırım maliyetleri, eski binalarda iyileştirme zorlukları ve şebeke kapasitesi sınırlamaları gibi teknik ve ekonomik engellerle karşı karşıyadır. Benimsemeyi hızlandırmak için sübvansiyonlar, performans standartları ve altyapı yatırımları yoluyla politika desteği şarttır. Sonuç olarak, ısı pompaları bina sektörünün karbonsuzlaştırılmasının temel bir unsurudur. Diğer sürdürülebilir teknolojiler ve destekleyici politika çerçeveleriyle entegrasyonları, iklim hedeflerine ulaşmak ve dünya çapında enerji verimli, düşük emisyonlu ısıtma sistemlerini teşvik etmek için kritik öneme sahip olacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Boban, L.; Miše, D.; Herceg, S.; Soldo, V. Application and Design Aspects of Ground Heat Exchangers. *Energies* 2021, 14, 2134. <https://doi.org/10.3390/en14082134>.
- [2] Rossi di Schio, E.; Ballerini, V.; Dongellini, M.; Valdiserri, P. Defrosting of Air-Source Heat Pumps: Effect of Real Temperature Data on Seasonal Energy Performance for Different Locations in Italy. *Appl. Sci.* 2021, 11, 8003.
- [3] Zelazna, A.; Pawłowski, A. · Review of the Role of Heat Pumps in Decarbonization of the Building Sector. *Energies* 2025, 18, 3255. <https://doi.org/10.3390/en18133255>.

AKILLI ENJEKSİYON KALIPLAMA SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ: MOBİL ENTEGRASYONLU İNSAN-MAKİNE ARAYÜZÜ (HMI) VE HASSAS KOVAN SICAKLIK KONTROLÜ

Muhammed Talha ALTUN¹

Erciyes Üniversitesi,
mtalhaaltun@erciyes.edu.tr - <https://orcid.org/0009-0001-0785-1225>

Doç. Dr. Bülent KAYA

Erciyes Üniversitesi,
bulentkaya@erciyes.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7943-8683>

ÖZET

Son yıllarda, enjeksiyon kalıplama yönteminin 3B baskı teknolojileri ile entegrasyonu, parçaların düşük adetli ve maliyet etkin üretimi için önemli bir alternatif haline gelmiştir. Ancak, çeliğe kıyasla tipik olarak daha düşük ısı iletkenliğe sahip olan 3B baskılı kalıpların kullanımında, mühendislik termoplastiklerinin işlenebilmesi için hassas sıcaklık kontrolünün sağlanması esastır. Bu amaçla özelleştirilebilir yapıdaki "Tam Elektrikli Mini Plastik Enjeksiyon Makinesi" (TEMPEM) tasarlanmış ve prototipi üretilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, TEMPEM ocak (barrel) kontrolü için modüler bir İnsan-Makine Arayüzü (HMI) geliştirilerek sistem üzerinde test edilmiştir. Kontrol sistemi; üç bağımsız 250 W kelepçe rezistansı yönetmek üzere bir Arduino Nano 33 IoT, Katı Hal Röleleri (SSR) ve MAX6675 termokupl yükseltici modüllerinden oluşmaktadır. Geleneksel PID denetleyicilerin aksine bu çalışmada, ısı davranışının simülasyonu ve optimum ısıtıcı gücünün tahmini için Model Öngörülü Kontrol (MPC) teorisi kullanılmıştır. Bu yaklaşımla, sıcaklık dalgalanmalarının minimize edilmesi ve sensör gürültüsüne karşı sistem direncinin artırılması hedeflenmiştir.

Geliştirilen kontrol sisteminin, Android tabanlı akıllı cihazlarla uyumlu ve taşınabilir olması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Unity 3D platformu kullanılarak Wi-Fi soket haberleşmesi üzerinden çalışan bir HMI geliştirilmiştir. Bu arayüz ile kullanıcı gerçek zamanlı izleme ve kontrol yapabilirken, aynı zamanda Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarına uygun, kişiselleştirilebilir bir protokol de sisteme entegre edilmiştir. Önerilen bu sistem; akademik araştırmalar ve küçük ölçekli imalat süreçleri için esnek, düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hızlı Kalıplama, Isıl Kontrol, İnsan-Makine Arayüzü (HMI), Kablosuz Kontrol Sistemleri, Nesnelerin İnterneti (IoT)

¹ Sorumlu yazar: Muhammed Talha ALTUN, mtalhaaltun@erciyes.edu.tr

SMART INJECTION MOLDING SYSTEM DEVELOPMENT: MOBILE- INTEGRATED HMI AND PRESCISE BARREL TEMPERATURE CONTROL

ABSTRACT

In recent years, the integration of injection molding with 3D printing technologies has emerged as a significant alternative for low-volume and cost-effective production. However, in the use of 3D-printed molds—which typically exhibit lower thermal conductivity compared to steel—precise temperature control is essential for the successful processing of engineering thermoplastics. For this purpose, a customizable "Fully Electric Mini Plastic Injection Machine" (TEMPEM) was designed and its prototype was manufactured.

Within the scope of this study, a modular Human-Machine Interface (HMI) was developed for the control of the TEMPEM barrel and tested on the system. The control system consists of an Arduino Nano 33 IoT, Solid-State Relays (SSRs), and MAX6675 thermocouple amplifier modules to manage three independent 250 W band heaters. In contrast to traditional PID controllers, this study utilizes Model Predictive Control (MPC) theory for the simulation of thermal behavior and the estimation of optimum heater power. This approach aims to minimize temperature fluctuations and enhance the system's robustness against sensor noise.

The developed control system is designed to be portable and compatible with Android-based smart devices. To this end, an HMI communicating via Wi-Fi socket communication was developed using the Unity 3D platform. While this interface allows users to perform real-time monitoring and control, a customizable protocol suitable for Internet of Things (IoT) applications has also been integrated into the system. Consequently, the proposed system offers a flexible, low-cost, and high-precision solution for both academic research and small-scale manufacturing.

Keywords: Rapid Tooling, Thermal Control, Human-Machine Interface (HMI), Wireless Control Systems, Internet of Things (IoT)

1. GİRİŞ

Polimer işleme teknolojilerinin temel taşı olan plastik enjeksiyon kalıplama, karmaşık geometrili parçaların yüksek hassasiyetle ve seri olarak üretilmesini sağlayan endüstriyel bir yöntemdir. Geleneksel enjeksiyon kalıplama süreçlerinde takım çeliğinden üretilen yüksek maliyetli kalıplar kullanılmaktadır. Ancak günümüzde Hızlı Prototipleme ihtiyacının artmasıyla birlikte, 3B baskı teknolojileri kullanılarak üretilen polimer/reçine esaslı kalıplar endüstride yaygınlaşmaya başlamıştır [1]. Bu kalıpların en büyük dezavantajı, düşük ısı iletkenlikleri ve yüksek sıcaklık dalgalanmalarına karşı çelik kalıplar kadar dirençli olmamalarıdır. Ayrıca düşük mukavemetleri nedeniyle yine, endüstriyel bir plastik enjeksiyon makinesinde kullanım olanakları sınırlıdır. Ancak, 3B baskı ile üretilen kalıplar, geleneksel çelik kalıplara kıyasla %80-90 oranında maliyet avantajı sağlayabilir ve üretim sürelerini %90

oranında kısaltabilir [2]. Bir diğer kalıplama süreci olan, Mikro kalıplama (micromolding) süreçlerinde ise eriyik plastiğin mikro boyutlu kalıp kavitelerine başarılı bir şekilde doldurulabilmesi için son derece hassas sıcaklık ve basınç kontrolü gerekmektedir [3].

Endüstriyel enjeksiyon makinelerinde sıcaklık kontrolü için uzun yıllardır Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrolcüler kullanılmaktadır [4]. Ancak PID kontrolcüler, sistemin mevcut ve geçmiş hatalarına odaklanarak işlem yaparlar ve kovan gibi yüksek "ısı ataleti" (thermal inertia) sahip sistemlerin gelecekteki tepkilerini öngöremezler [5]. Kapalı ısıtma sistemlerinde PID algoritmalarının, istenen hedef sıcaklığı yüksek oranda aştığı (overshoot) ve polimerin termal bozunmasına yol açabildiği bilinmektedir [6].

Bu çalışmada, geleneksel hidrolik makinelerin hantallığından arındırılmış, laboratuvar ortamında 3B baskı kalıplarla çalışmaya uygun, tam elektrikli mini plastik enjeksiyon makinesi "TEMPEM" için yeni nesil bir sıcaklık kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemde geleneksel PID metodolojisi yerine, sistemin fiziksel termodinamik modelini matematiksel olarak çözümleyen ve gelecekteki sıcaklık durumunu öngörerek ısıtıcı gücünü önceden optimize eden Model Öngörülü Kontrol (MPC) algoritması entegre edilmiştir.

2. OCAK ISISINDA KULLANILAN KONTROL TEORİLERİ

Bu çalışmada ocak kontrolü için PID ve MPC algoritmaları kullanılmıştır. Başlangıç olarak PID kontrol ile çeşitli deneyler yapılarak, ocağın ısı ataleti ile ilgili veriler elde edilmiş, daha sonra bu verilerle, yine PID parametre ayarları ve MPC fiziksel kontrol parametreleri bu ön kurulum deneylerinden toplanan veri analizleri ile elde edilmektedir.

2.1. PID Kontrol Teorisi

PID kontrolcü, endüstriyel otomasyon sistemlerinde en yaygın kullanılan geri beslemeli kontrol yapısıdır. Arduino üzerinde çalıştırılabilir durumda birçok PID kütüphanesi bulunmaktadır. Bu çalışmada da başlangıç olarak, Brett Beauregard Arduino kütüphanesi [7] kullanılmıştır.

Buna göre, PID kontrolün matematiksel ifadesi Denklem 1'de verilmiştir [8]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada $u(t)$ kontrol çıkışı, $e(t)$ hata sinyali (setpoint - proses değeri), K_p oransal kazanç, K_i integral kazanç ve K_d ise türev kazancıdır. Endüstriyel uygulamalarda PID parametreleri (K_p , K_i , K_d) genellikle Ziegler-Nichols [9] gibi analitik yöntemler veya operatör tecrübesine dayalı deneme-yanılma (heuristic) yaklaşımlarıyla belirlenmektedir. Bu çalışmadaki klasik PID kontrol testlerinde, karşılaşılan sistemin karmaşık ısı cevaplarından dolayı parametreler deneme-yanılma yöntemiyle ($K_p = 8.0, K_i = 0.2, K_d = 2.0$) ampirik olarak ayarlanmıştır. Sistemin yüksek ölü zamanı ($L = 70s$) nedeniyle, kullandığımız standart PID algoritması

gelecekteki ısı birikimini öngörememiş ve bu durum yüksek sıcaklık aşımına (overshoot) neden olmuştur. Bu zafiyet, çalışmanın temel motivasyonu olan başka bir kontrol modeli olan, Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control) algoritmasının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

2.2. Model Öngörülü Kontrol (MPC)

Model Öngörülü Kontrol (MPC), kontrol edilen sistemin matematiksel modelini kullanarak gelecekteki davranışı öngören ve optimal kontrol eylemlerini hesaplayan ileri düzey bir kontrol stratejisidir [10]. MPC algoritması her kontrol adımında sistemin modelini kullanarak bir öngörü ufkü boyunca gelecekteki davranışı simüle eder ve maliyet fonksiyonunu minimize eden optimal kontrol dizisini hesaplar [11]. Plastik enjeksiyon kovanı gibi ısı sistemlerinin termodinamik davranışı, birinci dereceden bir enerji dengesi denklemi Denklem 2 ile ifade edilmiştir [5], [12]:

$$C \frac{dT}{dt} = P \cdot u - h_a(T - T_{amb}) \quad (\text{Denklem 2})$$

Burada C ısı kapasite (J/K), T ölçülen anlık kovan sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), P maksimum ısıtıcı gücü (W), u kontrol sinyali / görev döngüsü oranı (0-1 arası), h_a ortam ısı transfer katsayısı (W/ $^{\circ}\text{C}$) ve T_{amb} ortam sıcaklığıdır. Yüksek ısıl ataletli kovan sistemlerinde, ısıtıcıya verilen elektrik enerjisi ile sensörde (termokupul) ölçülen sıcaklık artışı arasında fiziksel bir gecikme (ölü zaman, L) bulunur. Bu gecikme süresi boyunca rezistanslardan sisteme aktarılan, kovan çeliği tarafından emilen ancak henüz sıcaklık artışı olarak ölçülemeyen enerji, bu çalışmada "Boru Hattı Enerjisi" ($E_{pipeline}$) olarak tanımlanmış ve Denklem 3 ile hesaplanmıştır [13]:

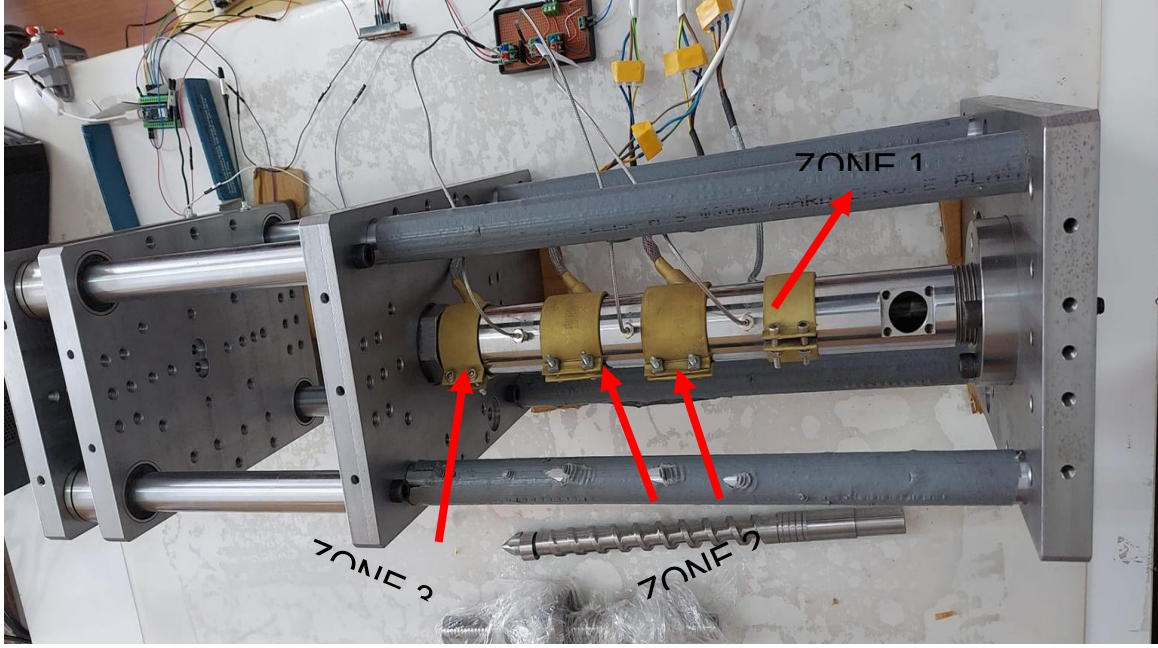
$$E_{pipeline} = \sum_{i=1}^N u_{hist}[i] \cdot P \cdot \Delta t \quad (\text{Denklem 3})$$

Burada $u_{hist}[i]$, geçmiş ölü zaman süreci boyunca uygulanan kontrol sinyallerinin hafıza dizisini; Δt , kontrol döngüsü örnekleme zamanını; N ise gecikme süresi içindeki toplam örneklem sayısını ($N = L/\Delta t$) temsil etmektedir. Sisteme uygulanan bu öngörü modeli sayesinde, hedefe ulaşmadan önce kovan içinde biriken bu artı enerji hesaba katılarak ısıtıcı gücü (u) proaktif olarak kesilmiş ve termal aşımın (overshoot) önüne geçilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Donanım Mimarisi

Geliştirilen, Tam Enjeksiyonlu Mini Plastik Enjeksiyon Makinesinin (TEMPEM) kovan yapısı Görsel 1 'de gösterildiği gibi, üç farklı ısıtma bölgesine ayrılmıştır: Zone 1 (Besleme - 250W), Zone 2 (Orta - 500W+500W) ve Zone 3 (Nozul - 250W). Toplam ısıtma kapasitesi 1500W'tır.



Görsel 1. TEMPEM Kovan/Ocak Üzerine Yerleştirilen, Kelepçe Rezistans ve Isıtma Bölgeleri

Ocak ısısının kontrolünde Arduino Nano 33 IOT ile entegre bir şekilde çalışan, ve fonksiyonları Çizelge 1 ile verilen sistem donanımı bileşenleri kullanılmıştır.

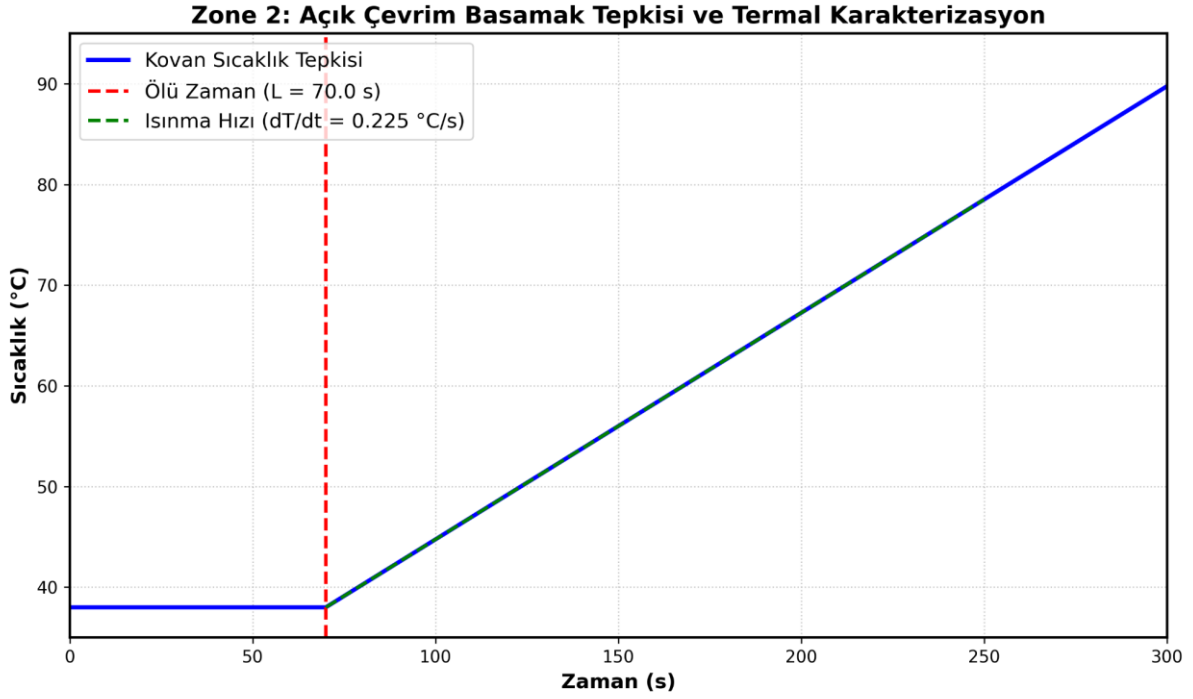
Çizelge 1. Sistem Donanım Bileşenleri

Bileşen	Model/Tip	İşlev
Mikrokontrolcü	Arduino Nano 33 IoT 33	Ana kontrol ve Wi-Fi
Termokupl Entegresi	MAX6675	K-tipi dijitalleştirme
Katı Hal Rölesi	SSR-25DA	AC yük anahtarlama
Termokupl	K-Tipi	Sıcaklık ölçümü

MAX6675 entegreleri, SPI protokolü üzerinden paralel olarak bağlanmıştır. SSR kontrol pinleri D3-D6, termokupl chip select pinleri D7-D9 olarak konfigüre edilmiştir. Bu Arduino Nano 33 pinleri ile, SSR tetiklenmesinde, 1 k Ω direnç ve NPN tipi (4 adet) transistörler yardımı ile harici bir güç kaynağı kullanılmıştır.

3.2. Termal Karakterizasyon ve Sistemin Modellenmesi

Model Öngörülü Kontrol (MPC) algoritmasının başarılı bir şekilde çalışabilmesi için, öncelikle sistemin fiziksel termal davranışının matematiksel olarak tanımlanması gerekmektedir. Kovanın en yüksek ısıl ataletine sahip olan Orta Bölgesi (Zone 2) referans alınarak açık çevrim (open-loop) basamak tepkisi testi uygulanmıştır (Görsel 2).



Görsel 2. Açık Çevrim Basamak Tepkisi Testi ve Karakterizasyon Eğrisi

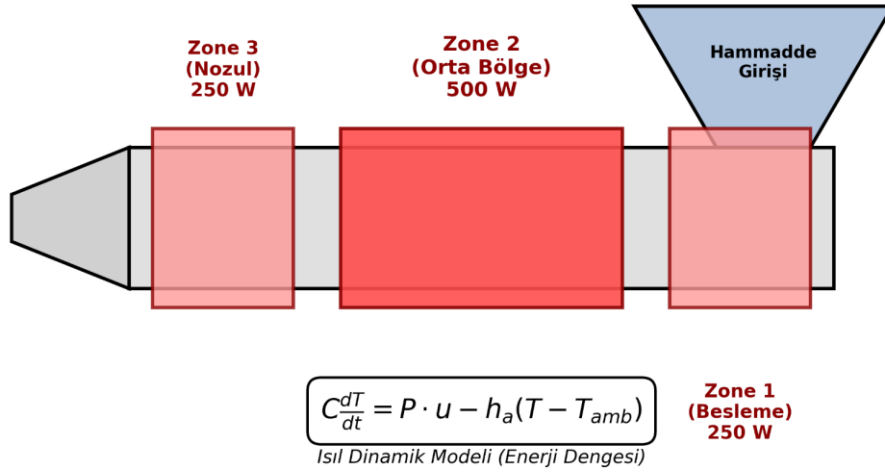
Sistem yaklaşık 38°C sıcaklığında dengeye getirildikten sonra %30 sabit ısıtıcı gücü (150W aktif güç) uygulanmış ve sıcaklık verileri 1 Hz (1 saniye) örnekleme ile kaydedilmiştir. Test sonucunda "Ölü Zaman" L 70 saniye olarak ölçülmüştür. Bu süre, ısıtıcılara güç verilmeye başlandığı an ile kovan sıcaklığının gerçek anlamda artışa geçtiği an arasındaki fiziksel iletim gecikmesidir. Deney sonucunda maksimum ısınma hızı (dT/dt) 0.225 °C/s olarak belirlenmiştir. Enerji korunumu prensibine dayanılarak Orta Bölgenin ısıl kapasitesi (C) Denklem 4 ile hesaplanmıştır:

$$C = \frac{P_{uygulanan}}{dT/dt} = \frac{150 \text{ W}}{0.225^\circ\text{C/s}} = 666.7 \text{ J/K} \quad (\text{Denklem 4})$$

3.3. Kontrol Algoritmaları (PID ve Fiziksel MPC)

Görsel 3 ile şematığı verilen bir plastik enjeksiyon kovanı gibi kapalı sistemlerin ısıl davranışı Denklem 5 ile ifade edilebilir.

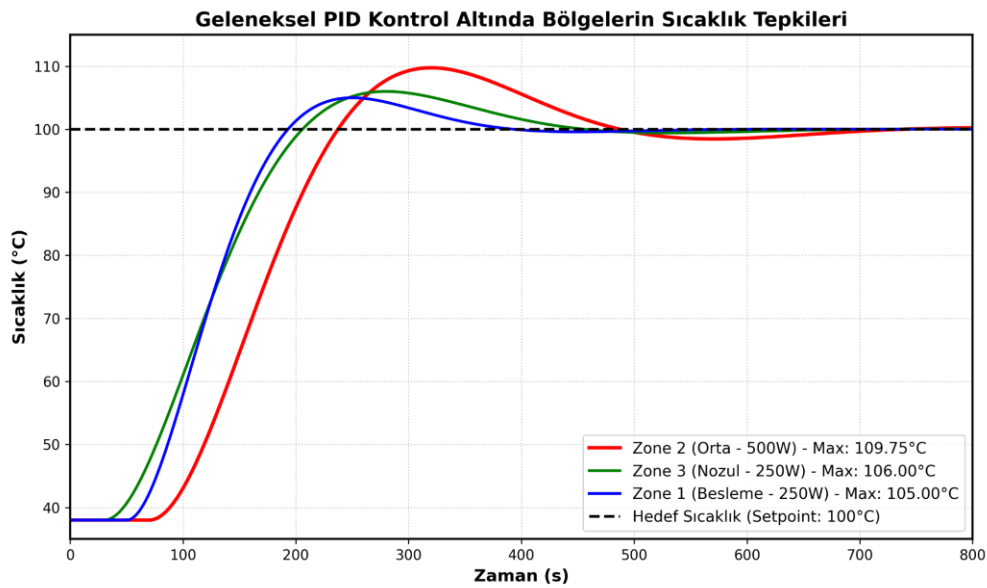
TEMPEM Enjeksiyon Kovanı Isıtma Bölgeleri ve Termal Dinamikleri



Görsel 3. Kovan Isıtma Dinamikleri ve Bölgeleri

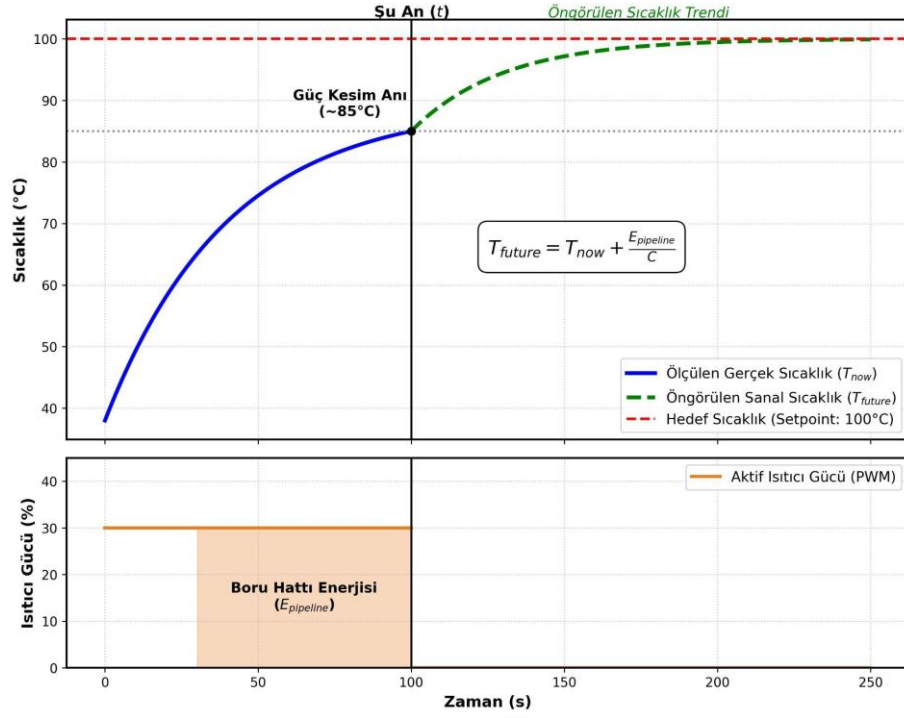
$$C \frac{dT}{dt} = P \cdot u - h_a (T - T_{amb}) \quad (\text{Denklem 5})$$

Ocak ısınısını tepkisinin gözlenmesinde, başlangıçta referans noktası oluşturması amacıyla standart bir PID kontrol uygulanmıştır. Bu amaçla, Arduino IDE tarafında Brett Beauregard [7] PID kütüphanesi kullanıldı. Ocağın yüksek ölü zamanı $L = 70s$ ve karmaşık ısı cevaplarından ötürü kontrol parametreleri ampirik deneme-yanılma (heuristic) yöntemiyle ($K_p = 8.0$, $K_i = 0.2$, $K_d = 2.0$) olarak ayarlanmıştır. Ancak, Görsel 4 ile gösterildiği üzere, kullandığımız PID algoritması, ısıtıcı kapansa bile sistemdeki ısı ataleti öngöremediği için ocak sıcaklıklarında sapmalara neden olmuştur.



Görsel 4. PID Kontrolde Sıcaklık Aşım Problemi

Bu problemin çözümü için ise, esasen günümüz 3D yazıcı nozullarında da aktif bir şekilde kullanılmakta olan Model Öngörülü Kontrol (MPC) algoritması kullanılmıştır. MPC, yüksek ısı atalet nedeniyle rezistanslardan aktarılan ancak henüz sensöre ulaşmayan "Boru Hattı Enerjisi" 'ni ($E_{pipeline}$) tahmin ederek ısıtıcı gücünü önceden kesmeyi hedeflemektedir. Ancak bunun için, öncelikle Boru hattı enerjisinin (Denklem 6) hesaplanması gerekmektedir.



Görsel 5. Model Öngörülü Kontrol Yaklaşımında Termal Öngörü

$$E_{pipeline} = \sum_{i=1}^N u_{hist}[i] \cdot P \cdot \Delta t \quad (\text{Denklem 6})$$

Kullandığımız algoritma, 1 saniyelik zaman döngülerinde gelecekteki sanal sıcaklığı;

$$T_{future} = T_{now} + \frac{E_{pipeline}}{C}$$

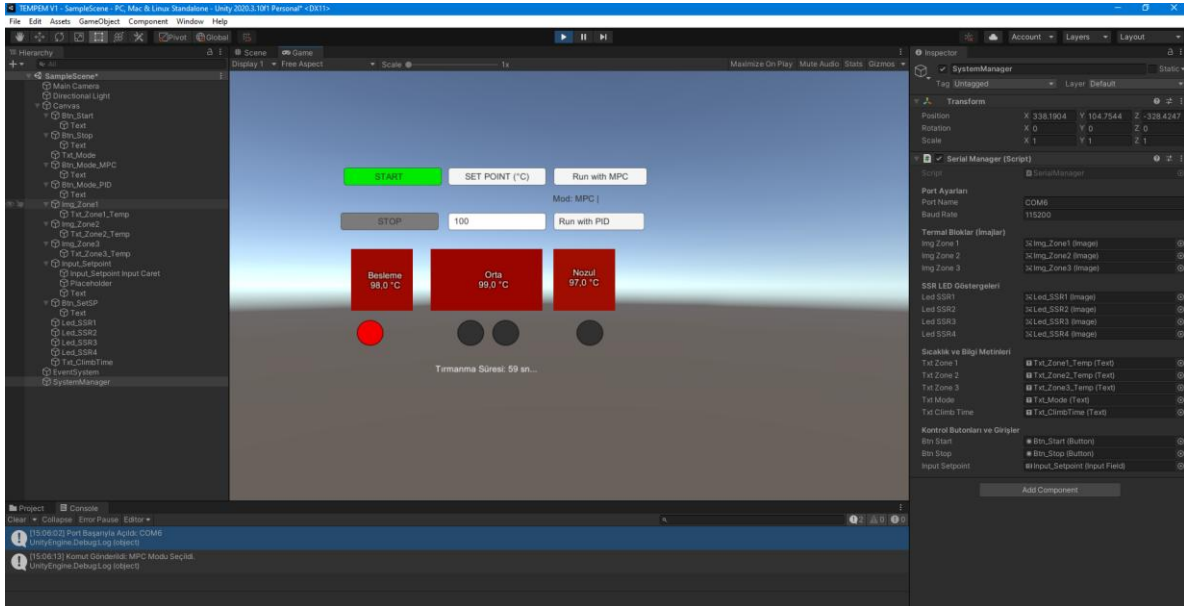
sürekli olarak hesaplamakta ve bu değer hedefe (setpoint) ulaştığı an, SSR (Solid-State Relay) ısıtıcı görev döngüsünü (Duty Cycle) zaman orantılı (Time-Proportioning) PWM ile %0'a çekmektedir. Görsel 5 ile verilen grafikte, MPC algoritmasının, 100 C°'lık hedefe ulaşmak için yaklaşık 85 C° civarında, röleleri kapattığı gözlenmektedir.

3.4. İnsan-Makine Arayüzü (HMI) Tasarımı ve Unity 3D Entegrasyonu

Geliştirilen "Tam Elektrikli Mini Plastik Enjeksiyon Makinesi" 'nin (TEMPER) tamamen akıllı

ve mobil platformlardan yönetilebilir olması amacıyla Wi-Fi haberleşme mimarisi kurgulanmıştır. Sistemin donanım merkezinde yer alan Arduino Nano 33 IoT mikrokontrolcüsü "Access Point" (AP) modunda çalıştırılarak doğrudan yerel bir Wi-Fi ağı oluşturmaktadır. Böylelikle, geliştirilen makineye güç verildiğinde Arduino kartı "TEMPEM_MAKINESI" adında bir ağ oluşturması sağlanmaktadır. Geliştirilen İnsan-Makine Arayüzü (HMI) ile, PC/Windows tabanlı bilgisayarlar ve Android tabanlı mobil akıllı cihazlar, TCP/IP soketi aracılığıyla oluşturulan bu ağa (192.168.4.1) bağlanarak, veri transferi ve kontrol sağlanabilmektedir.

İnsan-Makine Arayüzü uygulaması için Unity 3D oyun motoru kullanılmıştır [14]. Çalışmanın başlangıç aşamasında, aşağıda Görsel 6 ile verilen arayüz taslağı kullanılmıştır. Arayüzün merkezinde, üç farklı ısıtma bölgesinin (Besleme, Orta ve Nozul) anlık sıcaklık değerlerini ve Katı Hal Rölelerinin (SSR) anlık çalışma yüzdelerini (Duty Cycle) eşzamanlı olarak yansıtan yuvarlak (image knob) oyun objeleri ile, dinamik termal bloklar bulunmaktadır. Bu termal bloklar hedef sıcaklığa (setpointe) göre, sarıdan koyu kırmızıya doğru değişen renk gradiyentlerini üzerinde gösterebilmektedir. Kullanıcının, ekrandaki hedef sıcaklık giriş alanı (Set Point) üzerinden istenen erişik sıcaklığını ayarlayabilmesi ve ana kontrol butonları (Start / Stop) aracılığıyla tüm ısıtma prosesini uzaktan kontrol etmesi mümkündür. Ayrıca, arayüzde yer alan mod seçici sayesinde geleneksel PID ile Fiziksel MPC algoritmaları arasında geçiş yapılabilirken, "Tırmanma Süresi" bilgi ekranı üzerinden sistemin ayarlanan hedefe ulaşma hızı ve termal performansı gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir.



Görsel 6. Unity 3D Arayüzü Üzerinde Test Edilen (Play Mode) HMI Arayüzü Fonksiyonları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

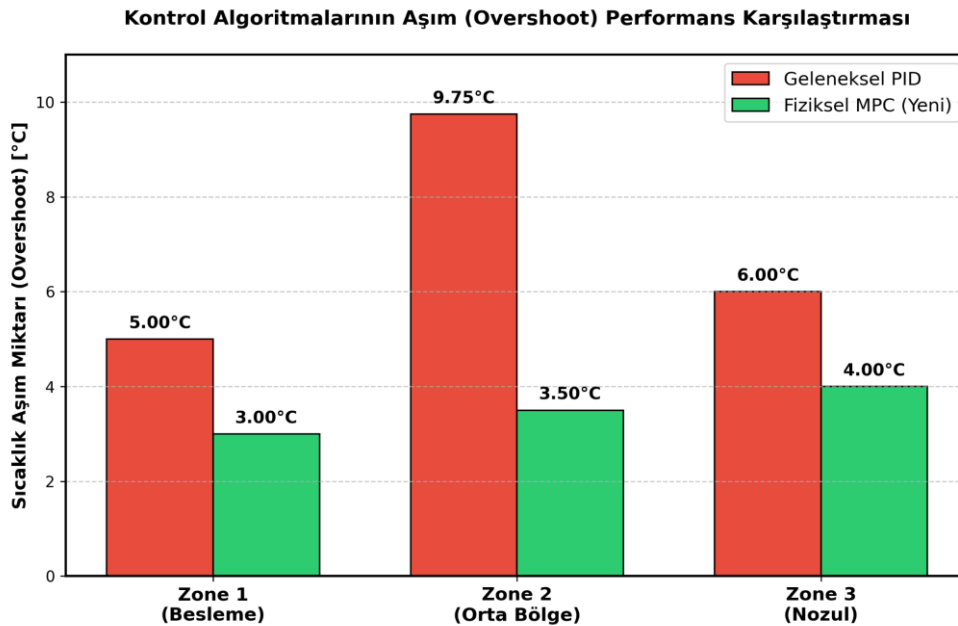
Performans testleri, enjeksiyon kovanının ısı kütlesi en yüksek olan Orta Bölgesi (Zone 2 - 500W kütlesi) öncelikli olmak üzere tüm bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Testlerde başlangıç

sıcaklığı $\sim 38^{\circ}\text{C}$, plastik eriyik hedef sıcaklığı (Setpoint) ise 100°C olarak belirlenmiştir. Kontrol algoritması döngüsü (Δt) 1 saniye olarak sabitlenmiş ve test sonuçları milisaniye hassasiyetinde kaydedilmiştir.

Sistem, klasik geri beslemeli PID algoritmasıyla çalıştırıldığında ısıtıcıların enerjiyi doğru anda kesemediği gözlenmiştir. En zorlu bölge olan Zone 2'de kovan sıcaklığı 100°C hedefini geçerek $109,75^{\circ}\text{C}$ seviyesine kadar yükselmiş ve yaklaşık 10°C 'lik bir aşım (overshoot) oluşturmuştur. Besleme bölgesinde (Zone 1) $105,0^{\circ}\text{C}$ ve Nozul bölgesinde (Zone 3) $106,0^{\circ}\text{C}$ ölçülen bu aşımlar, yüksek ısıl atalet karşısında, sezgisel yaklaşımla (heuristic search) atanan PID parametrelerinin, kontrol sağlamada beklenen performansı sağlamakta yetersiz kalmaktadır.

Deneyssel analizle elde edilen sistem parametreleri $C = 666.7 \text{ J/K}$ ve $L = 70 \text{ s}$ ile donatılan Fiziksel MPC algoritmasıyla aynı test senaryosu tekrar edilmiştir. "Boru Hattı Enerjisi" fonksiyonunu devreye alan algoritma, hedef 100°C olmasına rağmen sıcaklık henüz 85°C civarındayken SSR görev döngüsünü (PWM) kesmeye başlamıştır. Bu proaktif öngörü stratejisi sonucunda, kütleli Orta Bölge (Zone 2) yalnızca $103,5^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarak hedefe son derece kararlı ve yumuşak bir şekilde oturmuştur. Zone 1 bölgesinde aşım $103,0^{\circ}\text{C}$, Zone 3'te ise $104,0^{\circ}\text{C}$ ile sınırlı kalmıştır.

Kullanılan kontrol algoritmalarının bölgelere göre sıcaklık aşımı performansları Görsel 7'de verilmiştir. Veriler incelendiğinde, fiziksel MPC uygulamasının PID algoritmasına göre hedef aşımını 9.75°C 'den 3.5°C 'ye indirerek, yaklaşık %64 oranında başarı sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, sistemin 100°C hedefine ulaşma süresi kısalmış ve hedef sıcaklıktaki dalgalanmalar azalmıştır. MPC algoritmasının gelecekteki sıcaklık artışını önceden tahmin edebilme yeteneğinin, polimer malzemede ısıya bağlı bozulma riskini de en aza indireceği öngörülmektedir.



Görsel 7. PID ve MPC Sıcaklık Performans Grafiği

5. SONUÇ

Bu çalışmada, 3B baskı yöntemiyle üretilen reçine/polimer kalıpların düşük maliyetli imalat süreçlerine entegrasyonu için "Tam Elektrikli Mini Plastik Enjeksiyon Makinesi" (TEMPEM) donanımı ve yazılım altyapısı geliştirilmiştir. Test verileri, endüstride yaygın olarak kullanılan standart PID algoritmalarının kovan çeliğindeki yüksek ısı ataleti ($L = 70s$) yönetmede yetersiz kaldığını ve polimer malzemenin termal bozulmasına (degradasyonuna) yol açabilecek yüksek sıcaklık aşımalarına neden olduğunu göstermiştir. Bu sorunun çözümü için sistemin enerji dinamiklerini temel alan Fiziksel (yarı-ampirik) MPC yaklaşımı uygulanmış, böylelikle ısı aşımları %65 oranında azaltılarak hedeflenen eriyik sıcaklığında çok daha kararlı ve güvenli bir kontrol imkanı yakalanmıştır.

Donanım ve yazılım entegrasyonu kapsamında, pahalı endüstriyel PLC ekranlara alternatif olarak Arduino Nano 33 IoT ve Unity 3D oyun motoru kullanılarak TCP/IP tabanlı, Android uyumlu mobil bir İnsan-Makine Arayüzü (HMI) geliştirilmiştir. TEMPEM gövdesi üzerinde herhangi bir fiziksel ekran veya gösterge paneli bulunmamakta; bunun yerine kullanıcıların uygulama mağazalarından kendi akıllı cihazlarına indirebilecekleri yazılım aracılığıyla sistem, tam entegre ve dinamik bir görsel arayüze kavuşmaktadır. Bu altyapı, akademik kurumlar ve küçük ölçekli imalatçılar için yüksek grafiksel performansa sahip, donanım maliyetlerinden arındırılmış, erişilebilir ve yenilikçi bir otomasyon çözümü sunmaktadır.

İlerleyen aşamalarda, sisteme çelik enjeksiyon vidasının ve kalıplanacak polimer granül malzemenin (PLA, ABS vb.) dahil edilmesiyle kovanın termal kapasitesi (C) artacağı varsayılmaktadır. Sistemdeki bu değişimler, geleneksel PID parametrelerinin yeniden ayarlanmasını zorunlu kılacaktır. MPC algoritması ise deneme-yanılma olmaksızın, yalnızca güncel açık çevrim test verileriyle yeni dinamiklere doğrudan adapte olabilecektir. Ayrıca, Unity 3D platformunun sunduğu geliştirme esnekliği sayesinde, mevcut mobil arayüz sadece sıcaklık kontrolü ile sınırlı kalmayacaktır. Geliştirilen bu haberleşme altyapısı, ilerleyen süreçte sistemdeki tüm servo motorların ve mekanik enjeksiyon ünitelerinin hareketlerini eşzamanlı olarak izleyip yönetecek şekilde genişletilecektir. Bu çalışma, TEMPEM'in tüm donanım ve ilişkili parametrelerinin anlık olarak simüle edilebildiği kapsamlı bir 'Dijital İkiz' (Digital Twin) modeline dönüştürülmesi için atılan ilk adımdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2025-14701 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından dolayı üniversitemize teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] A. Kampker, J. Triebs, S. Kawollek, P. Ayvaz, and T. Beyer, “Direct polymer additive tooling – effect of additive manufactured polymer tools on part material properties for injection moulding,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 10, pp. 1575–1584, Sep. 2019, doi: 10.1108/rpj-07-2018-0161.
- [2] C. Schwaar, “3D Printing Injection Molds – The Ultimate Guide,” *All3DP Pro*. Erişim Tarihi: Mar. 11, 2026. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printing-injection-molds-the-ultimate-guide/>
- [3] J. Giboz, T. Copponnex, and P. Mélé, “Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 6, pp. R96–R109, May 2007, doi: 10.1088/0960-1317/17/6/r02.
- [4] K. J. Åström and T. Hägglund, *Advanced PID Control*. International Society of Automation, 2006.
- [5] D. E. Seborg, D. A. Mellichamp, T. F. Edgar, and F. J. D. III, *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, 2016.
- [6] Y. F. Zhang, M. Li, and J. M. Dai, “PID Heating and Temperature Control Method Based On Dynamic Assignment,” in *Proceedings of the 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017)*, Paris, France: Atlantis Press, 2017. Erişim Tarihi: Ocak. 16, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2991/icmmcce-17.2017.208>
- [7] br3ttb, “GitHub - br3ttb/Arduino-PID-Library,” *GitHub*. Erişim Tarihi: Şubat 9, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library>
- [8] “Improving the Beginner’s PID – Introduction,” *Project Blog*. Erişim Tarihi: Şubat. 9, 2026. [Online]. Available: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction>
- [9] G. A. Philbrick, “Discussion: ‘Optimum Settings for Automatic Controllers’ (Ziegler, J. G., and Nichols, N. B., 1942, *Trans. ASME*, 64, pp. 759–765),” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 64, no. 8, pp. 766–766, Nov. 1942, doi: 10.1115/1.4019266.
- [10] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*. Springer Verlag, 1999.
- [11] Y. Peng, W. Wei, and J. Wang, “Model Predictive Synchronous Control of Barrel Temperature for Injection Molding Machine Based on Diagonal Recurrent Neural Networks,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 28, no. 1, pp. 24–30, Dec. 2012, doi: 10.1080/10426914.2012.718476.

- [12] M. H. Costin, P. A. Taylor, and J. D. Wright, “On the dynamics and control of a plasticating extruder,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 22, no. 17, pp. 1095–1106, Dec. 1982, doi: 10.1002/pen.760221707.
- [13] “Model Predictive Temperature Control,” tombrasier. Erişim Tarihi: Mart 10, 2026. [Online]. Available: https://marlinfw.org/docs/features/model_predictive_control.html
- [14] “Unity: Develop, Deploy, and Grow,” Unity. Erişim Tarihi: Mart 11, 2026. [Online]. Available: <http://unity3D.com>

A VEHICLE DYNAMICS–BASED CONCEPTUALIZATION OF ACTIVE SAFETY SYSTEMS AS REAL-TIME BOUNDARY MANAGEMENT MECHANISMS

Öğr. Gör., Metin KAYNAKLI

Bitlis Eren Üniversitesi,

mkaynakli@beu.edu.tr – 0000-0001-8372-1345

Dr. Öğr. Üyesi., Ahmet ALBAYRAK

Düzce Üniversitesi,

ahmetalbayrak@duzce.edu.tr - 0000-0002-2166-1102

ABSTRACT

Active safety systems are designed to prevent loss-of-control situations by intervening before vehicle instability evolves into an accident. Although contemporary research often emphasizes sensing technologies, data fusion, and algorithmic decision-making within Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), the operation of active safety systems is fundamentally constrained by vehicle dynamics and tire–road interaction limits. This study presents a dynamics-centered interpretation, framing active safety as a real-time boundary management mechanism rather than a performance-enhancing solution. The physical foundations of active safety are examined through longitudinal, lateral, and vertical vehicle dynamics. Anti-lock Braking Systems (ABS) are analyzed in terms of longitudinal slip regulation near peak tire–road friction while preserving steering controllability. Electronic Stability Control (ESC) is interpreted as a yaw stability regulator mitigating understeer and oversteer via selective braking. The influence of vertical load transfer and combined-slip constraints is further evaluated to illustrate the reduction of available control authority under critical maneuvers. The study proposes a unified boundary management framework that clarifies both the capabilities and inherent limitations of active safety systems. The findings emphasize that such systems do not extend physical stability limits but regulate proximity to them to preserve controllability. This dynamics-based perspective complements sensor- and algorithm-oriented approaches and supports transparent integration into higher-level driver assistance and automated driving architectures.

Keywords: Active safety systems, vehicle dynamics, tire–road interaction, Anti-lock Braking System (ABS), Electronic Stability Control (ESC)

1. INTRODUCTION

Road traffic accidents remain one of the leading causes of fatalities and serious injuries worldwide, despite continuous improvements in vehicle technologies and transportation infrastructure. According to global safety assessments, a substantial portion of severe accidents is associated with loss-of-control scenarios, particularly under adverse road conditions, high dynamic demand, or inappropriate driver reactions [1]. These observations underline the limitations of purely reactive safety measures and emphasize the necessity of preventive strategies capable of intervening before vehicle instability evolves into an unavoidable collision.

Historically, automotive safety development focused primarily on passive safety systems, such as seat belts, airbags, and structural crashworthiness, which aim to mitigate injury severity after an accident has occurred. While these systems have proven highly effective in reducing fatalities, they do not address the underlying dynamic mechanisms that lead to loss of vehicle controllability [2]. As traffic density increased and vehicle performance capabilities expanded, it became evident that improving safety outcomes required a fundamental shift from post-impact protection toward systems capable of actively influencing vehicle motion during critical driving situations.

This paradigm shift led to the emergence of active safety systems, which intervene directly in the vehicle's longitudinal and lateral dynamics to prevent instability. Among these systems, Anti-lock Braking Systems (ABS) and Electronic Stability Control (ESC) represent two of the most influential technological advancements in modern vehicle safety. ABS was introduced to prevent wheel lock-up during braking, thereby preserving steering capability, while ESC was developed to regulate yaw motion and maintain directional stability during cornering and combined maneuvers [2], [3]. Together, these systems form the backbone of contemporary active safety architectures.

In recent years, active safety systems have increasingly been discussed within the broader framework of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), where sensing technologies, data fusion, and algorithmic decision-making play a central role. Camera-, radar-, and lidar-based perception systems, combined with advanced control algorithms, have significantly enhanced the responsiveness and situational awareness of modern vehicles. However, this perception-driven narrative may unintentionally obscure a fundamental aspect of active safety: regardless of sensing accuracy or computational sophistication, all control interventions remain strictly constrained by the physical limits imposed by vehicle dynamics and tire–road interaction [3], [4].

From a physical perspective, vehicle dynamics defines the feasible motion envelope within which a vehicle can operate safely. Longitudinal acceleration and deceleration, lateral cornering capability, and yaw response are all governed by the forces generated at the tire–road interface. These forces are inherently limited by available friction, which depends on road surface conditions, tire characteristics, and normal load distribution [4], [5]. When demanded forces exceed these limits, loss of controllability becomes unavoidable, independent of control strategy or system intelligence. From this perspective, active safety systems can be interpreted as real-time boundary management mechanisms operating on vehicle dynamics within the physical limits imposed by tire–road interaction, rather than as purely sensor- or algorithm-

driven solutions, as illustrated in Figure 1. These systems do not extend physical limits; instead, they regulate proximity to stability boundaries to preserve controllability during safety-critical maneuvers.

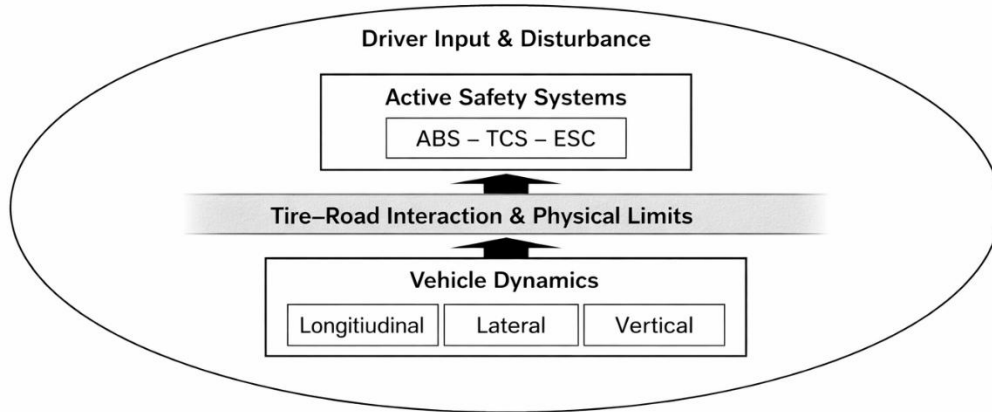


Figure 1. Vehicle dynamics-centered positioning of active safety systems as real-time boundary management mechanisms operating within physical tire–road limits.

Within this context, active safety systems should not be interpreted as mechanisms that extend physical limits, but rather as systems that regulate vehicle behavior in close proximity to these limits. ABS, for instance, does not increase the maximum available braking force; instead, it continuously modulates brake pressure to maintain wheel slip near the region of peak friction, thereby preventing wheel lock-up and preserving directional control [5], [6]. Similarly, ESC does not enhance lateral grip beyond tire capabilities but selectively applies braking forces to generate corrective yaw moments, counteracting understeer or oversteer tendencies before instability fully develops [6], [7].

This interpretation positions active safety systems as real-time boundary management mechanisms operating within a multidimensional stability envelope defined by vehicle dynamics and tire–road interaction. Longitudinal slip limits, lateral yaw stability boundaries, and load-transfer-induced variations in normal force collectively define the operational constraints within which control actions must remain feasible. Empirical studies have demonstrated that regulating vehicle motion within these boundaries significantly reduces accident risk, particularly in emergency maneuvers and low-friction conditions [8].

Despite their proven effectiveness, misunderstandings regarding the capabilities of active safety systems persist, especially as vehicles become increasingly automated. Overestimating system performance or assuming that control algorithms can overcome physical constraints may lead to unsafe reliance on automated interventions. Therefore, a clear and physically grounded interpretation of active safety operation is essential, not only for system designers but also for the integration of these functions into higher-level driver assistance and automated driving architectures.

The primary objective of this study is to present a concise yet comprehensive, vehicle dynamics–centered framework for understanding active safety systems. By systematically examining longitudinal, lateral, and vertical vehicle dynamics, the paper emphasizes the role of ABS and ESC as boundary management mechanisms rather than limit-extending solutions. This perspective aims to clarify both the capabilities and inherent limitations of active safety systems and to provide a robust physical foundation that complements perception- and algorithm-oriented approaches in modern vehicle safety research.

2. VEHICLE DYNAMICS AS THE PHYSICAL BASIS OF ACTIVE SAFETY

Vehicle dynamics provides the fundamental physical framework that governs the motion of a road vehicle under all operating conditions and defines the boundaries within which safe and controllable behavior can be maintained. From an active safety perspective, vehicle dynamics is not merely a theoretical construct used for modeling or offline analysis, but a real-time physical process that must be continuously monitored, interpreted, and regulated during vehicle operation [2], [3].

All active safety systems ultimately interact with the vehicle through forces and moments generated at the tire–road interface. Regardless of the complexity of sensing technologies or control algorithms, the effectiveness of any intervention is constrained by the vehicle’s ability to generate longitudinal and lateral forces within the limits imposed by friction, load distribution, and inertial effects [3], [4]. Consequently, a clear understanding of vehicle dynamics is essential for interpreting the true role and limitations of systems such as Anti-lock Braking Systems (ABS) and Electronic Stability Control (ESC).

The dynamic behavior of a vehicle is commonly decomposed into three coupled components: longitudinal, lateral, and vertical dynamics. While these components are often analyzed separately for clarity, they interact strongly during safety-critical maneuvers such as emergency braking, evasive steering, or braking while cornering. Active safety systems must therefore operate within a multidimensional and time-varying stability envelope shaped by the interaction of these dynamic modes [3].

2.1 Longitudinal Vehicle Dynamics and Braking Stability

Longitudinal vehicle dynamics describe the motion of a vehicle along its direction of travel and are primarily governed by traction and braking forces generated at the tire–road interface. During braking maneuvers, the ability of a tire to generate longitudinal force depends on the slip ratio between the wheel and the road surface, which exhibits a highly nonlinear relationship with the friction coefficient [4], [5].

As wheel slip increases from pure rolling conditions, the longitudinal force rises until a peak friction region is reached. Beyond this point, further increases in slip result in a rapid decline in available friction, leading to wheel lock-up and a loss of steering controllability. This nonlinear

behavior defines a critical braking stability boundary that cannot be exceeded without compromising vehicle control [4].

Anti-lock Braking Systems are specifically designed to exploit this friction–slip characteristic by dynamically modulating brake pressure at individual wheels. Rather than maximizing braking force indiscriminately, ABS continuously adjusts brake pressure to maintain wheel slip near the region of peak friction, where braking efficiency and directional stability are jointly optimized [5], [6]. By preventing wheel lock-up, ABS preserves the tire’s ability to generate lateral forces, enabling the driver to retain steering authority during emergency braking.

The nonlinear relationship between longitudinal slip ratio and friction coefficient therefore establishes a physically imposed stability boundary, which is actively regulated by the Anti-lock Braking System to prevent loss of controllability, as illustrated in Figure 2. From a vehicle dynamics perspective, ABS does not increase the maximum available friction; instead, it ensures that braking interventions remain within the usable portion of the tire–road interaction envelope.

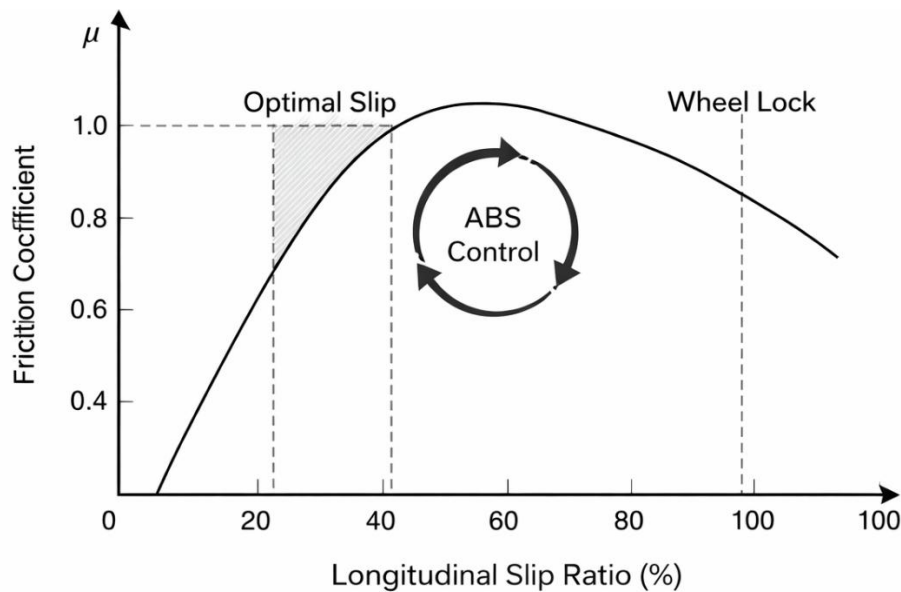


Figure 2. The Anti-lock Braking System (ABS) exploits this nonlinear μ –slip relationship by dynamically modulating brake pressure to maintain wheel slip within the optimal adhesion region.

From a vehicle dynamics perspective, ABS does not increase the maximum achievable braking force. Instead, it acts as a boundary regulation mechanism that ensures braking interventions remain within the usable portion of the tire–road interaction envelope. This interpretation highlights the role of ABS as a stability-preserving system rather than a performance-enhancing one, particularly under low-friction or spatially varying road conditions.

2.2 Lateral Vehicle Dynamics, Yaw Motion, and Stability Limits

Lateral vehicle dynamics govern a vehicle's ability to follow a desired trajectory during cornering maneuvers and are primarily determined by lateral tire forces and yaw motion. Under nominal driving conditions, the yaw response of the vehicle closely follows the driver's steering input, resulting in stable path tracking. However, when lateral force demands approach the friction limits of the tires, the vehicle may experience a loss of stability [2], [3].

Such instability typically manifests as understeer or oversteer, depending on the distribution of lateral forces between the front and rear axles. Understeer occurs when the front tires saturate first, causing the vehicle to follow a wider path than intended, whereas oversteer arises when rear tire saturation induces excessive yaw motion. Both phenomena represent violations of lateral stability boundaries imposed by tire–road interaction [3], [4].

Electronic Stability Control is designed to detect and mitigate these instability conditions by continuously comparing the driver's intended yaw behavior with the actual vehicle response. When deviations exceed predefined thresholds, ESC intervenes by selectively applying braking forces at individual wheels to generate corrective yaw moments [6], [7]. These interventions counteract excessive or insufficient yaw motion without requiring additional steering input from the driver.

This selective braking action enables ESC to counteract excessive or insufficient yaw motion without requiring additional steering input from the driver. Electronic Stability Control therefore actively regulates lateral stability by managing proximity to yaw stability boundaries, as illustrated in Figure 3. Importantly, ESC does not extend the available tire–road friction limits; rather, it redistributes braking forces to restore balance within the existing physical constraints.

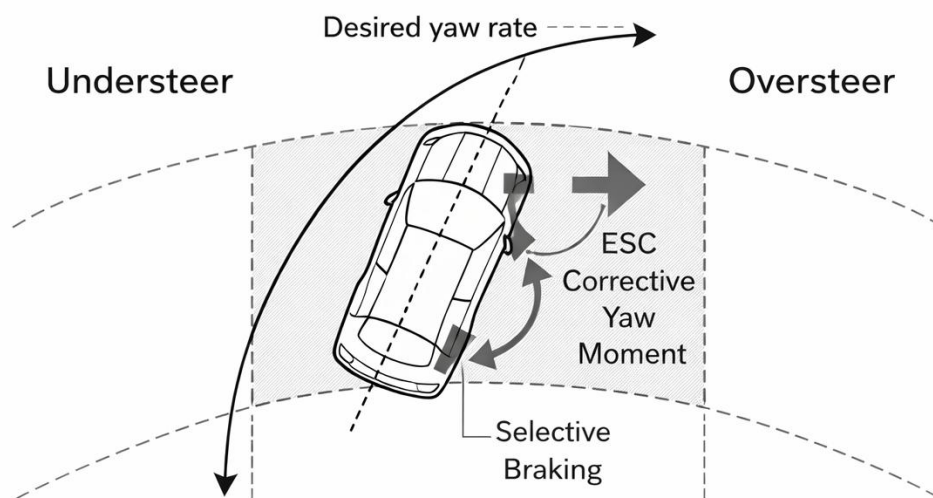


Figure 3. Lateral vehicle dynamics and yaw stability control, illustrating understeer and oversteer regions and ESC corrective yaw moment generation.

Importantly, ESC does not extend the available lateral grip of the tires. Instead, it redistributes braking forces to manage yaw motion within the existing physical constraints of the tire–road interface. From a dynamics-based perspective, ESC therefore functions as a yaw boundary management mechanism that prioritizes vehicle stability and controllability over aggressive path-following performance.

2.3 Vertical Vehicle Dynamics and Load Transfer Effects

Vertical vehicle dynamics describe the distribution of normal forces acting on individual tires and play a critical role in determining the available longitudinal and lateral force capacity. During acceleration, braking, and cornering maneuvers, inertial effects induce dynamic load transfer between axles and across the vehicle body, altering the normal forces at each tire contact patch [2], [3].

An increase in normal force generally enhances a tire’s force-generating potential; however, this relationship is nonlinear and subject to diminishing returns at higher loads. As a result, dynamic load transfer not only changes the magnitude of available forces but also affects their distribution among individual wheels, influencing overall vehicle stability [4].

Although vertical dynamics are often less emphasized in discussions of active safety, their influence is fundamental. Uneven load distribution can reduce the effectiveness of braking and yaw control interventions if not properly accounted for. Active safety systems implicitly address these effects through wheel-individual control strategies, modulating brake pressure at each wheel in accordance with instantaneous force capacity [6].

Thus, vertical vehicle dynamics act as a supporting mechanism that shapes the feasible operating region of active safety systems. By accounting for load transfer effects in real time, systems such as ABS and ESC ensure that control actions remain compatible with dynamically changing physical constraints.

2.4 Tire–Road Interaction and Combined Slip Constraints

The tire–road interface defines the ultimate physical limits within which all vehicle control and active safety systems must operate. The forces generated at the contact patch are constrained by available friction, which depends on road surface conditions, tire properties, and normal load [4], [5].

In many safety-critical scenarios, tires are required to simultaneously generate longitudinal and lateral forces, such as during braking while cornering or evasive maneuvers. Under these combined-slip conditions, the available friction must be shared between force components, resulting in reduced capacity in each direction [4].

When combined force demands exceed the frictional capability of the tire–road interface, loss of controllability becomes unavoidable regardless of control strategy or system intelligence.

Active safety systems therefore cannot overcome these physical constraints. Instead, they continuously adapt braking and stability interventions to manage proximity to the combined-slip boundary, prioritizing controllability over force maximization [3].

This perspective reinforces the interpretation of active safety systems as boundary management mechanisms rather than limit-extending solutions, particularly under low-friction or rapidly changing road conditions.

2.5 Active Safety Systems as Boundary Management Mechanisms

The analyses presented in Sections 2.1–2.4 demonstrate that active safety systems operate within a multidimensional stability envelope defined by longitudinal slip limits, lateral yaw stability boundaries, vertical load transfer effects, and combined-slip constraints. These boundaries collectively define the feasible region of vehicle motion that must not be exceeded if controllability is to be preserved [3], [4].

Within this framework, systems such as ABS and ESC do not aim to increase physical limits. Instead, they continuously regulate vehicle behavior near critical boundaries through adaptive, wheel-individual control actions. Brake pressure modulation, selective wheel braking, and torque intervention are employed to prevent excursions beyond stability limits rather than to maximize performance metrics [6], [7].

Framing active safety systems as real-time boundary management mechanisms provides a unifying physical interpretation that clarifies both their capabilities and inherent limitations. This perspective is particularly valuable as vehicles progress toward higher levels of automation, where a clear understanding of physical feasibility remains essential for safe and reliable system integration.

3. DISCUSSION

The dynamics-centered interpretation presented in this study offers a critical complement to the dominant perception- and algorithm-oriented narratives that currently characterize much of the active safety and ADAS literature. While advances in sensing technologies, data fusion, and control algorithms have undoubtedly improved system responsiveness and situational awareness, the results of this study emphasize that the ultimate effectiveness of active safety interventions remains fundamentally constrained by physical vehicle dynamics and tire–road interaction limits [3], [4].

A recurring issue in contemporary discussions of active safety and automated driving is the implicit assumption that improvements in sensing accuracy or computational intelligence can compensate for physical limitations. From a vehicle dynamics perspective, this assumption is problematic. No level of perception fidelity or control sophistication can overcome violations of friction limits or stability boundaries imposed by the tire–road interface. When demanded longitudinal or lateral forces exceed available friction, loss of controllability becomes inevitable, regardless of system intelligence or intervention speed [4], [5].

The boundary management framework proposed in this study directly addresses this misconception by explicitly framing active safety systems as regulators of proximity to physical limits rather than as mechanisms that extend those limits. Within this framework, Anti-lock Braking Systems and Electronic Stability Control are interpreted not as performance-enhancing technologies, but as stabilizing systems designed to preserve controllability under high-demand conditions. This distinction is critical, as it aligns system capabilities with physical feasibility and reduces the risk of unrealistic performance expectations.

The discussion of ABS and ESC within a unified boundary management perspective also clarifies their shared operating principles despite differing control objectives. ABS primarily regulates longitudinal slip to prevent wheel lock-up and maintain steering capability, whereas ESC manages yaw dynamics to counteract understeer and oversteer tendencies. Nevertheless, both systems rely on selective, adaptive control actions that aim to prevent excursions beyond stability boundaries rather than to maximize force generation [6], [7]. This commonality is often obscured in system-level descriptions that emphasize functional differences without sufficient consideration of underlying physical constraints.

Empirical studies evaluating the effectiveness of ESC in real-world traffic scenarios further support the importance of boundary regulation over limit extension. Large-scale statistical analyses have consistently shown significant reductions in single-vehicle crashes and loss-of-control accidents for vehicles equipped with ESC, particularly under low-friction conditions [8]. These findings are consistent with the interpretation that stabilizing vehicle motion near physical limits, rather than attempting to push beyond them, yields substantial safety benefits.

As vehicles progress toward higher levels of automation, the implications of this discussion become increasingly significant. Automated driving systems rely heavily on layered architectures in which perception, decision-making, and control modules operate in sequence. Without an explicit integration of vehicle dynamics constraints into higher-level decision-making layers, there is a risk that automated systems may request maneuvers that are physically infeasible under prevailing road conditions. Embedding a dynamics-based boundary management perspective into automated driving architectures can therefore enhance transparency, improve explainability, and reduce unsafe reliance on automation.

Another important implication of the proposed framework relates to driver–system interaction. Overconfidence in active safety or automated systems may lead drivers to adopt riskier behaviors, assuming that the vehicle can always compensate for critical situations. A clear communication of system limitations, grounded in physical feasibility rather than abstract algorithmic performance, is essential to mitigate such behavioral adaptations. The boundary management interpretation provides a conceptually simple yet physically accurate basis for conveying these limitations to both system designers and end users.

Finally, the discussion highlights the necessity of interdisciplinary alignment between vehicle dynamics, control engineering, and perception research. While perception systems determine what the vehicle knows about its environment, and control algorithms decide how to respond,

vehicle dynamics ultimately dictates what responses are physically achievable. Treating these domains in isolation risks creating mismatches between decision intent and execution capability. A dynamics-centered framework, as proposed in this study, helps ensure that higher-level safety and automation functions remain grounded in physical reality.

In summary, the discussion reinforces the central argument that active safety systems should be understood and evaluated primarily through the lens of vehicle dynamics and physical boundary management. This perspective not only clarifies system capabilities and limitations but also provides a robust foundation for the safe integration of active safety functions into increasingly automated vehicle architectures.

4. CONCLUSION

This study presented a vehicle dynamics-centered interpretation of active safety systems, framing them as real-time boundary management mechanisms operating within the immutable physical limits imposed by tire-road interaction. By shifting the focus from perception- and algorithm-dominated narratives toward fundamental vehicle dynamics, the paper clarified that the effectiveness of active safety interventions is ultimately governed by physical feasibility rather than computational sophistication.

Through the systematic examination of longitudinal, lateral, and vertical vehicle dynamics, the analysis demonstrated that Anti-lock Braking Systems and Electronic Stability Control preserve vehicle controllability by regulating proximity to stability boundaries, rather than by extending physical limits. ABS maintains braking stability by controlling wheel slip near peak friction regions, while ESC stabilizes yaw motion through selective braking interventions that counteract understeer and oversteer tendencies. Vertical load transfer and combined-slip constraints were shown to further shape the feasible operating envelope of these systems.

By unifying these mechanisms under a boundary management framework, the study provided a concise and physically grounded perspective that clarifies both the capabilities and inherent limitations of active safety systems. This interpretation reduces the risk of unrealistic performance expectations and supports a more transparent integration of active safety functions into higher-level driver assistance and automated driving architectures.

In conclusion, understanding active safety systems through the lens of vehicle dynamics and physical boundary management offers a robust foundation for the design, evaluation, and integration of future safety and automation technologies. As vehicle automation advances, maintaining a clear alignment between decision-making strategies and physical feasibility will remain essential for ensuring safe and reliable vehicle operation.

REFERENCES

- [1] World Health Organization, *Global Status Report on Road Safety*, WHO, Geneva.

- [2] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE International, 1992.
- [3] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed., Springer, 2012.
- [4] H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed., Elsevier, 2012.
- [5] E. Bakker, L. Nyborg, H. B. Pacejka, “The Magic Formula Tyre Model,” *Vehicle System Dynamics*, 1992.
- [6] U. Kiencke, L. Nielsen, *Automotive Control Systems*, Springer, 2005.
- [7] E. Liebmenn et al., “Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP),” *Proc. ESV Conference*, 2005.
- [8] C. M. Farmer, “Effects of Electronic Stability Control,” *Traffic Injury Prevention*, 2006.

EVOLUTION FROM ACTIVE SAFETY SYSTEMS TO ADAS: A VEHICLE DYNAMICS AND SENSOR FUSION–BASED SYSTEM-LEVEL REVIEW

Öğr. Gör., Metin KAYNAKLI

Bitlis Eren Üniversitesi,

mkaynakli@beu.edu.tr – 0000-0001-8372-1345

Dr. Öğr. Üyesi, Ahmet ALBAYRAK

Düzce Üniversitesi,

ahmetalbayrak@duzce.edu.tr - 0000-0002-2166-1102

ABSTRACT

Road traffic safety has evolved from a predominantly reactive paradigm centered on passive protection toward a proactive and preventive approach driven by active safety systems and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). This transformation has been enabled by advances in vehicle dynamics control, sensing technologies, electronic control units, and data-driven decision-making architectures. This paper presents a structured and system-level overview of active safety systems in automotive engineering, emphasizing their evolution toward ADAS and automated driving technologies. Fundamental vehicle dynamics concepts are discussed as the physical basis of safety-critical interventions, followed by a systematic review of core active safety systems such as the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC). Building upon this foundation, key ADAS functionalities—including Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB), lane support systems, blind spot detection, and traffic sign recognition—are examined from a perception- and control-oriented perspective. Particular emphasis is placed on the role of sensors and sensor fusion architectures in enhancing perception reliability and decision accuracy. Rather than focusing on isolated subsystems, this study adopts an integrated engineering perspective that highlights the interaction between vehicle dynamics, sensing, control algorithms, and human factors. The paper aims to provide a coherent reference framework for researchers, engineers, and students, while supporting the transition toward safer and more intelligent mobility systems.

Keywords: Active Safety Systems, ADAS, Vehicle Dynamics, Sensor Fusion, Automotive Safety, Autonomous Driving

1. INTRODUCTION

Road transportation plays a central role in modern societies by enabling economic development, social interaction, and individual mobility. However, the continuous increase in vehicle ownership, traffic density, and average operating speeds has led to a persistent rise in both the frequency and severity of road traffic accidents worldwide [1], [2]. Despite continuous improvements in vehicle technologies, traffic management strategies, and road infrastructure, traffic accidents remain one of the leading causes of fatalities and serious injuries, representing a major global public health and safety concern [3].

Recent studies emphasize that traffic safety cannot be addressed solely through driver behavior, education, or enforcement measures. Instead, it requires integrated engineering solutions that combine vehicle dynamics control, active safety systems, sensing technologies, and intelligent driver assistance functions within a unified framework [3], [4]. The increasing complexity of modern traffic environments, characterized by heterogeneous traffic participants, higher vehicle automation levels, and dense urban mobility, has further exposed the limitations of traditional reactive safety approaches [5].

Historically, automotive safety engineering initially focused on passive safety systems designed to mitigate injury severity after a collision had already occurred. Technologies such as seat belts, airbags, and crashworthy vehicle structures have significantly improved occupant protection and have contributed to substantial reductions in fatality rates over the past decades [3], [6]. Nevertheless, passive safety inherently addresses the consequences of accidents rather than their root causes, offering limited effectiveness in preventing accident occurrence, particularly in complex and dynamic driving scenarios.

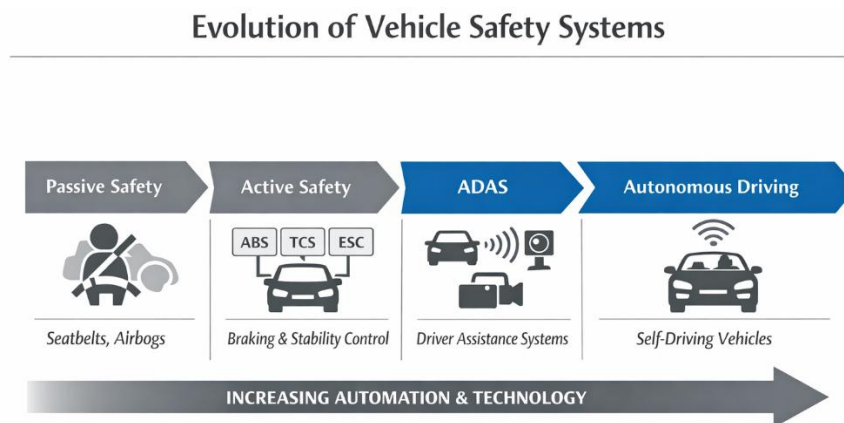


Figure 1. Evolution of automotive safety systems from passive safety to active safety, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), and autonomous driving, illustrating the increasing level of automation and system intelligence.

As illustrated in Figure 1, the evolution of automotive safety systems has followed a progressive transition from reactive protection mechanisms toward proactive and intelligent safety architectures. The introduction of active safety systems marked a fundamental paradigm shift by enabling vehicles to intervene before a critical loss of control or collision occurs. Early active safety technologies, including the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC), expanded safety beyond structural protection by

actively supervising vehicle dynamics and maintaining controllability near physical limits [6], [7]. These systems transformed safety from a purely mechanical concept into a real-time control problem governed by vehicle dynamics, sensing, and feedback control.

Building upon this foundation, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) further extended the scope of active safety by incorporating environmental perception and driver support functionalities. By utilizing onboard sensors such as radar and cameras, together with real-time data processing, ADAS enables early hazard detection, shared control, and context-aware interventions, significantly reducing accident risk and severity [7], [8]. Functions such as Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB), lane support systems, and blind spot detection illustrate this transition toward perception-based safety strategies that actively support the driver during critical driving situations [9].

This evolutionary trajectory ultimately leads toward automated and autonomous driving, where perception, decision-making, and control functions are increasingly automated in accordance with standardized automation taxonomies such as SAE J3016 [10]. In this context, active safety systems and ADAS can be regarded as intermediate and enabling layers that bridge conventional vehicle control with higher levels of automation and autonomy.

For many decades, automotive safety engineering relied predominantly on vehicle-centric control strategies that focused on maintaining stability and controllability without explicitly considering the surrounding environment. However, real-world accident analyses and near-miss studies have demonstrated that many critical situations arise from interactions between the vehicle, other traffic participants, and infrastructure elements rather than from vehicle instability alone [5]. This realization has driven a shift toward integrated safety concepts that combine vehicle dynamics control with environmental perception and human-machine interaction.

Accordingly, this paper aims to provide a structured and system-level overview of active safety systems and their evolution toward Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) within the context of automotive engineering. Rather than treating safety functions as isolated subsystems, the study emphasizes the interaction between vehicle dynamics, sensing technologies, control algorithms, and human factors. By adopting this holistic perspective, the paper seeks to clarify the role of active safety as a critical bridging layer between conventional vehicle control and higher levels of automated and autonomous driving, while offering a coherent reference framework for researchers, engineers, and students.

2. VEHICLE DYNAMICS AS THE BASIS OF ACTIVE SAFETY

Vehicle dynamics constitutes the fundamental physical foundation upon which all active safety systems are designed and implemented. It describes the motion behavior of a vehicle under the influence of longitudinal, lateral, and vertical forces and defines the operational limits within which safe and stable driving can be maintained [1], [2]. From an active safety perspective,

vehicle dynamics is not merely a theoretical framework, but a continuously monitored and actively controlled process that directly governs system decision-making and intervention strategies.

Longitudinal vehicle dynamics governs acceleration and deceleration behavior and plays a central role in braking- and traction-related safety functions. During braking maneuvers, the interaction between tire slip ratio and road friction determines the maximum achievable braking force while preserving steering controllability. Due to the nonlinear relationship between tire slip and friction coefficient, excessive slip leads to wheel lock-up and a significant reduction in lateral force generation [2]. Active safety systems such as the Anti-lock Braking System (ABS) exploit this relationship by modulating brake pressure in real time to maintain wheel slip within an optimal range, thereby maximizing braking efficiency while preserving directional control [6].

In acceleration scenarios, longitudinal dynamics is equally critical for maintaining traction and stability. Excessive drive torque can induce wheel spin, particularly on low-friction surfaces, resulting in degraded traction and reduced vehicle controllability. Traction-oriented safety functions detect excessive longitudinal slip by monitoring wheel speed differences and intervene through engine torque reduction and/or selective wheel braking [3], [6]. These interventions enhance straight-line stability and contribute indirectly to improved lateral control during combined acceleration and cornering maneuvers.

Lateral vehicle dynamics primarily governs cornering behavior and directional stability. As vehicle speed increases or curve radius decreases, the lateral forces required from the tires rise rapidly, bringing the vehicle closer to its physical adhesion limits. When these limits are exceeded, understeer or oversteer conditions may occur, potentially leading to loss of control [1], [2]. Electronic Stability Control (ESC) systems address these phenomena by continuously comparing the driver's intended trajectory—derived from steering input and vehicle speed—with the actual vehicle motion measured by yaw rate and lateral acceleration sensors [6], [7].

When a deviation between intended and actual vehicle motion is detected, ESC generates corrective yaw moments through selective wheel braking and, when necessary, coordinated engine torque intervention. From a control-theoretic perspective, ESC represents a closed-loop yaw stabilization system operating near the physical limits of tire–road adhesion. The objective of such interventions is not to override the driver but to assist in restoring stability while preserving driver authority and vehicle controllability [6].

Vertical vehicle dynamics and dynamic load transfer further influence the effectiveness of active safety interventions. Braking, acceleration, and cornering maneuvers induce transient load shifts between axles and individual wheels, altering the normal forces acting on the tires and, consequently, the available friction forces [2]. Active safety systems must account for these effects to ensure that control actions remain physically feasible, particularly under combined-slip conditions where longitudinal and lateral tire forces are simultaneously demanded.

From a system-level perspective, active safety can be interpreted as the real-time management of vehicle dynamics close to stability boundaries. Control algorithms rely on simplified yet

physically interpretable vehicle models, combined with sensor feedback, to estimate the instantaneous vehicle state. When deviations from stable behavior are detected, timely and coordinated interventions are applied to restore controllability. This continuous interaction between physical vehicle behavior and electronic control systems represents the core principle of modern active safety engineering and forms the foundation for higher-level driver assistance functions [1], [3].

3. FUNDAMENTAL ACTIVE SAFETY SYSTEMS

Fundamental active safety systems constitute the first and most critical layer of preventive vehicle safety in modern automotive engineering. These systems are designed to maintain vehicle controllability by ensuring that tire–road interaction remains within physically feasible limits during critical driving maneuvers. Among them, the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC) form the core architecture of active vehicle safety and represent the foundation upon which more advanced driver assistance functions are built [3], [6].

The Anti-lock Braking System (ABS) was the earliest widely adopted active safety technology and marked a milestone in the transition from purely mechanical braking systems to electronically controlled safety functions. ABS prevents wheel lock-up during emergency braking by modulating brake pressure at each wheel individually. By maintaining wheel slip within an optimal range, ABS preserves steering controllability and enables the driver to perform evasive maneuvers while braking, particularly on low-friction surfaces [2], [6]. From a vehicle dynamics perspective, ABS exploits the nonlinear relationship between tire slip ratio and the friction coefficient, ensuring that maximum longitudinal braking force is achieved without compromising lateral force generation.

While ABS primarily addresses braking scenarios, the Traction Control System (TCS) extends active safety principles to acceleration and traction management. Excessive wheel spin at the driven wheels, especially during acceleration on low-adhesion surfaces, can significantly degrade vehicle stability and directional control. TCS detects excessive longitudinal slip by comparing the rotational speeds of driven and non-driven wheels and intervenes through engine torque reduction and/or selective wheel braking [3], [6]. By limiting wheel spin, TCS improves traction utilization and contributes to enhanced vehicle stability during combined acceleration and cornering maneuvers.

Electronic Stability Control (ESC) represents the most comprehensive and influential system among fundamental active safety technologies. Unlike ABS and TCS, which primarily address longitudinal dynamics, ESC actively supervises the vehicle's lateral motion and yaw behavior. The system continuously compares the driver's intended trajectory—derived from steering input and vehicle speed—with the actual vehicle motion measured by yaw rate and lateral acceleration sensors [4], [6]. When deviations indicative of understeer or oversteer are detected, ESC generates corrective yaw moments through selective wheel braking and, if necessary, coordinated engine torque intervention.

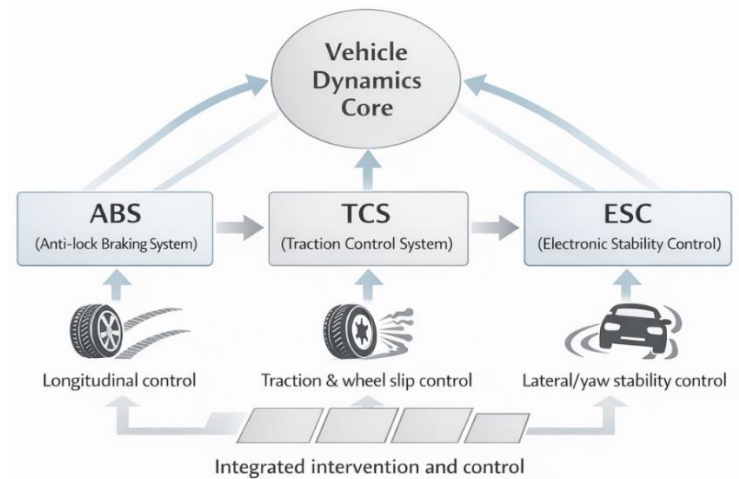


Figure 2. Integrated structure of fundamental active safety systems, illustrating the interconnection of the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC) within a unified vehicle dynamics control framework.

From a control engineering perspective, ESC can be interpreted as a closed-loop yaw stabilization system operating near the physical limits of tire–road adhesion. The primary objective of ESC is not to replace driver control but to support the driver in maintaining vehicle stability by applying corrective interventions that are timely, precise, and minimally intrusive. Extensive experimental studies and real-world accident statistics have demonstrated that ESC significantly reduces single-vehicle accidents and loss-of-control crashes, making it one of the most effective safety technologies introduced in recent decades [4], [6].

Although ABS, TCS, and ESC are often described as distinct safety functions, modern vehicles implement these systems within an integrated control architecture rather than as independent modules. As illustrated in Figure 2, fundamental active safety systems are interconnected through a unified vehicle dynamics control framework in which longitudinal braking, traction management, and lateral stability control are coordinated in real time. This integration ensures that control interventions are coherent and non-conflicting, particularly in complex driving scenarios involving simultaneous braking, acceleration, and steering inputs.

In contemporary vehicle electronic architectures, ABS, TCS, and ESC share common sensors, actuators, and electronic control units, enabling efficient information exchange and coordinated decision-making. This integrated structure not only enhances overall safety performance but also provides a scalable foundation for higher-level Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Consequently, fundamental active safety systems should be regarded not as isolated technologies, but as a cohesive control layer that bridges basic vehicle dynamics control and perception-based safety functions [3], [7].

4. ADAS FUNCTIONS AND PERCEPTION TECHNOLOGIES

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) represent an important evolution of active safety by extending risk assessment beyond internal vehicle dynamics to include perception of the surrounding traffic environment. While fundamental active safety systems such as ABS, TCS, and ESC primarily intervene when vehicle stability limits are approached, ADAS functions aim to anticipate hazardous situations at an earlier stage and support the driver through warnings, guidance, and limited automated interventions [7], [8].

One of the most widely deployed ADAS functions is Adaptive Cruise Control (ACC), which enhances conventional cruise control by actively regulating vehicle speed relative to a preceding vehicle. Using radar- and camera-based perception, ACC continuously monitors inter-vehicle distance and relative speed and adjusts acceleration and deceleration to maintain a safe following gap [8], [9]. By reducing unnecessary speed fluctuations and supporting the driver in longitudinal control tasks, ACC contributes to improved driving comfort and a measurable reduction in rear-end collision risk. Autonomous Emergency Braking (AEB) systems are among the most safety-critical ADAS functions and have demonstrated substantial effectiveness in real-world accident prevention. AEB systems continuously assess collision risk by analyzing parameters such as relative speed, distance to obstacles, and time-to-collision. When an imminent collision is detected, the system typically follows a staged intervention strategy, beginning with driver warnings and progressing to partial or full automatic braking if the driver response is insufficient [9], [14].

Lane-based assistance systems address safety risks associated with unintended lateral deviations, which are often caused by driver distraction, fatigue, or reduced situational awareness. Lane Departure Warning (LDW) systems provide visual, auditory, or haptic alerts when the vehicle unintentionally departs from its lane, whereas Lane Keeping Assist (LKA) systems apply limited corrective steering torque to guide the vehicle back toward the lane center [10]. These systems rely primarily on camera-based perception to detect lane markings and estimate the vehicle's lateral position relative to the roadway.

Blind Spot Detection (BSD) and Lane Change Assistance (LCA) systems further enhance lateral situational awareness by monitoring adjacent lanes using short- and medium-range radar sensors. By providing timely warnings when other vehicles are present in areas not directly visible to the driver, these systems help reduce the risk of side collisions during lane change maneuvers [10]. Traffic Sign Recognition (TSR) systems complement these functions by detecting and interpreting relevant traffic signs and presenting this information to the driver in real time. The effectiveness of ADAS functions is fundamentally dependent on the reliability and robustness of environmental perception. Sensors such as radar and cameras provide complementary information about the driving environment, but each sensing modality exhibits inherent limitations related to range, resolution, field of view, and sensitivity to environmental conditions [10], [13].

To address these limitations, modern ADAS architectures increasingly rely on multi-sensor perception and fusion strategies. By combining information from heterogeneous sensors, perception systems can mitigate individual sensor weaknesses and generate a more consistent and reliable representation of the driving environment [11], [12].

Overall, ADAS functions embody a proactive safety philosophy that emphasizes early hazard detection, shared control, and effective human–machine cooperation. Rather than replacing the driver, ADAS systems are designed to augment human perception and decision-making capabilities and to act as a transitional safety layer that bridges conventional vehicle control systems with more advanced automated driving functionalities [7].

5. SENSOR FUSION AND FUTURE TRENDS

As active safety systems continue to evolve toward more advanced ADAS functionalities and higher levels of driving automation, the reliability and robustness of environmental perception have become decisive factors for overall system performance. Single-sensor perception approaches are inherently limited by noise, restricted fields of view, environmental sensitivity, and partial observability of complex traffic scenarios. Consequently, sensor fusion has emerged as a fundamental enabling technology for modern active safety and ADAS architectures [15].

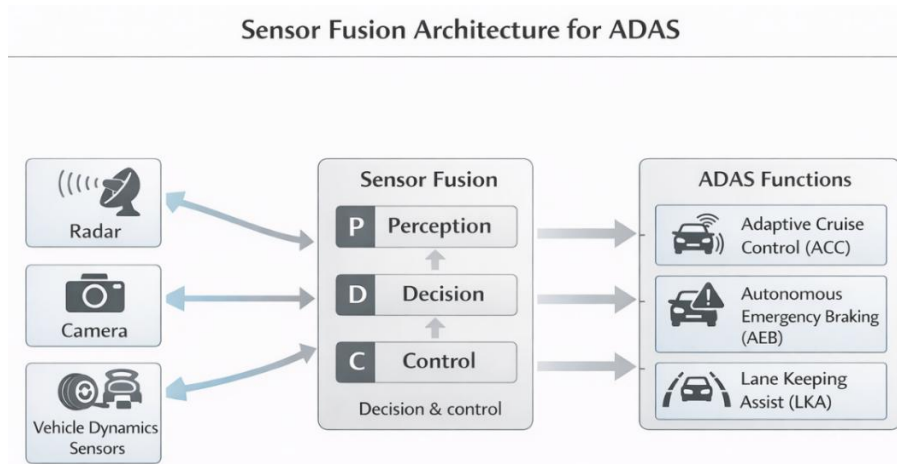


Figure 3. Sensor fusion architecture for ADAS, illustrating the integration of radar, camera, and vehicle dynamics sensors into a unified perception, decision-making, and control framework supporting multiple ADAS functions.

Sensor fusion refers to the systematic integration of information obtained from multiple sensing modalities—such as radar, cameras, lidar, and vehicle dynamics sensors—in order to generate a more accurate, consistent, and robust representation of the driving environment. By combining complementary sensor characteristics, fusion-based perception systems reduce uncertainty and improve situational awareness under diverse traffic and environmental conditions [15], [16]. As illustrated in Figure 3, multi-sensor fusion architectures form a unified perception layer that supports downstream decision-making and control functions.

From an architectural perspective, sensor fusion strategies can be categorized according to the level at which information is combined, commonly referred to as data-level, feature-level, and decision-level fusion [16]. Data-level fusion operates directly on raw sensor measurements and can achieve high estimation accuracy, but it requires precise sensor synchronization and substantial computational resources. Feature-level fusion integrates higher-level features

extracted from individual sensors, offering a balance between performance and computational efficiency. Decision-level fusion combines the outputs of independent perception or classification modules, providing modularity and robustness at the expense of reduced granularity.

In active safety applications, sensor fusion is not limited to external environment perception alone. Vehicle dynamics information—including wheel speeds, longitudinal and lateral acceleration, yaw rate, and steering angle—is jointly evaluated with object detection and tracking results to enable context-aware risk assessment. The same external hazard may pose different levels of risk depending on vehicle speed, available tire–road friction, and driver intent. Fusion-based perception thus enables safety functions to adapt their intervention strategies according to both external conditions and internal vehicle states [3], [15].

Recent advances in machine learning and artificial intelligence have further enhanced the capabilities of sensor fusion frameworks. Deep learning–based perception models have demonstrated significant performance improvements in object detection, classification, and scene understanding tasks, particularly in complex urban environments [16], [17]. However, purely data-driven approaches introduce challenges related to transparency, explainability, validation, and functional safety—issues that are especially critical in safety-related automotive applications.

As a result, current research trends increasingly emphasize hybrid system architectures that combine physics-based vehicle models with data-driven perception and decision-making modules. Such hybrid approaches leverage the interpretability and physical consistency of model-based methods while benefiting from the adaptability and performance of learning-based techniques. This combination is widely regarded as a promising pathway toward robust, explainable, and certifiable active safety and ADAS systems [16], [18].

Another important future trend is the growing emphasis on human–machine interaction and driver monitoring. As ADAS functions assume higher levels of control authority, maintaining appropriate driver awareness and engagement becomes a safety-critical requirement. Sensor fusion architectures are therefore expanding to incorporate driver monitoring sensors and contextual information, enabling a more holistic and human-centered safety framework [18].

Overall, sensor fusion represents a key technological bridge between conventional active safety systems and more advanced automated driving functionalities. By enhancing perception reliability, enabling context-aware decision-making, and supporting adaptive control strategies, fusion-based architectures form the backbone of next-generation automotive safety systems and will play a decisive role in the ongoing transition toward safer, more intelligent, and human-centered mobility [15], [18].

6. CONCLUSIONS

This paper has presented a comprehensive and system-level overview of active safety systems in automotive engineering, with a particular emphasis on their evolution toward Advanced

Driver Assistance Systems (ADAS). Rather than addressing individual safety functions as isolated subsystems, the study adopted an integrated perspective that highlights the dynamic interaction between vehicle dynamics, sensing technologies, control algorithms, and human factors.

Fundamental active safety systems such as the Anti-lock Braking System (ABS), Traction Control System (TCS), and Electronic Stability Control (ESC) were examined as the physical and functional foundation of preventive vehicle safety. These systems demonstrate how real-time vehicle dynamics control can effectively mitigate loss-of-control scenarios by maintaining tire–road interaction within physically feasible limits. The analysis emphasized that the effectiveness of such systems is inherently constrained by vehicle dynamics, tire characteristics, and road friction conditions, underscoring the importance of physically consistent and robust control strategies.

Building upon this foundation, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) were discussed as an extension of active safety toward perception-based and proactive risk mitigation. Functions such as Adaptive Cruise Control (ACC), Autonomous Emergency Braking (AEB), lane-based assistance systems, and blind spot monitoring illustrate how environmental perception and shared control strategies can significantly reduce accident risk and severity. These systems shift automotive safety from a predominantly reactive paradigm toward a more anticipatory and preventive approach while preserving the driver’s supervisory role.

Sensor fusion was identified as a critical enabling technology for modern active safety and ADAS architectures. By integrating heterogeneous sensor data with vehicle dynamics information, fusion-based perception frameworks enhance robustness, reliability, and situational awareness across a wide range of driving scenarios. The discussion highlighted that sensor fusion is not merely a performance enhancement but a necessary architectural element for achieving consistent safety behavior in complex and uncertain traffic environments.

The paper further emphasized emerging research trends toward hybrid system architectures that combine physics-based vehicle models with data-driven perception and decision-making techniques. While machine learning–based approaches offer substantial performance improvements, challenges related to transparency, explainability, validation, and functional safety remain critical considerations in safety-related automotive applications. Addressing these challenges is essential for ensuring industrial acceptance, regulatory compliance, and public trust in next-generation automotive safety systems.

In conclusion, active safety systems should be regarded as a crucial bridging layer between conventional vehicle control and higher levels of automated driving. Their continued development, integration, and validation will play a decisive role in improving traffic safety, reducing accident severity, and supporting the transition toward safer, more intelligent, and human-centered mobility systems. The system-level framework presented in this study aims to serve as a coherent reference for researchers, engineers, and students engaged in the design, evaluation, and deployment of future automotive safety technologies.

REFERENCES

- [1] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed., Springer, 2012.
- [2] H. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed., Elsevier, 2012.
- [3] Bosch, *Bosch Automotive Handbook*, 10th ed., Wiley, 2018.
- [4] M. Klomp, “Vehicle Stability Control Systems,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 32, no. 5, pp. 38–55, 2012.
- [5] J. Ackermann and T. Bunte, “Robust prevention of limit cycles for robustly decoupled car steering dynamics,” *Kybernetika*, vol. 35, no. 1, pp. 105–116, 1999.
- [6] P. van Zanten, “Bosch ESP Systems: 5 Years of Experience,” *SAE Technical Paper* 2000-01-1633, 2000.
- [7] S. E. Shladover, “Connected and Automated Vehicle Systems,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 10, no. 1, pp. 7–19, 2018.
- [8] J. C. Hayward, “Near Miss Determination through Use of a Scale of Danger,” *Highway Research Record*, no. 384, 1972.
- [9] Euro NCAP, *AEB Test Protocol and Rating Guidelines*, European New Car Assessment Programme, 2023.
- [10] SAE International, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems*, SAE J3016, 2021.
- [11] D. J. Yeong et al., “Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, 2021.
- [12] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, *Probabilistic Robotics*, MIT Press, 2005.
- [13] Y. Bar-Shalom, X. R. Li, T. Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*, Wiley, 2001.
- [14] K. Huang et al., “Multi-Modal Sensor Fusion for Autonomous Driving Perception,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023.
- [15] A. Eskandarian (Ed.), *Handbook of Intelligent Vehicles*, Springer, 2012.
- [16] N. Lu et al., “A Review of Driver Monitoring Systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, 2022.
- [17] European Commission, *ADAS and Active Safety Systems*, ERSO Report, 2024.

**FREN BALATALARINDA ARAMİD ve CAM ELYAFLI TEKSTİL
KATMANLARININ SÜRTÜNME STABİLİTESİ ve AŞINMA PERFORMANSINA
ETKİSİ**

Doç.Dr., Ali Can YILMAZ

Çukurova Üniversitesi

acyilmaz@cu.edu.tr - 0000-0001-9832-9880

Doç.Dr., Özlem ERDEM YILMAZ

Çukurova Üniversitesi

ozlemerdem@cu.edu.tr - 0000-0002-0976-2162

ÖZET

Aramid ve cam elyaf içerikli ince tekstil katmanların otomotiv fren balatalarının tribolojik performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, standart balata, aramid elyaf ara tabakalı balata ve cam elyaf ara tabakalı balata olmak üzere üç farklı numune hazırlanmış ve pin-on-disk tribometresi ile kuru sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi, numunelerin aşınma miktarları ve yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, aramid elyafli ara tabakanın sürtünme katsayısını daha kararlı hale getirdiğini ve sürtünme katsayısındaki düşüşü en aza indirdiğini göstermiştir. Aramid takviyeli numunede sürtünme katsayısı 0.40 seviyesinden test sonuna dek 0.36'ya çok küçük bir azalma gösterirken, standart numunede 0.45'ten 0.37'ye düşüş gözlenmiştir. Cam elyaf takviyeli numune ise başlangıçta yüksek sürtünme katsayısına (0.43) ulaşmasına karşın test sonunda 0.34'e inerek en belirgin fade (azalma) davranışını sergilemiştir. Aşınma ölçümleri, aramid elyafli katman kullanılan balatanın en düşük kütle kaybına (standartla kıyasla yaklaşık %50 daha az) sahip olduğunu, cam elyafli katmanlı balatanın ise aşınmayı orta düzeyde azalttığını göstermiştir. Sonuç olarak, fren balatası yüzeyinde ince bir aramid elyaf tekstil ara tabakası kullanımı, sürtünme kararlılığını artırıp aşınmayı belirgin ölçüde azaltarak balata performansını iyileştirmektedir. Elde edilen bulgular, fren balatalarında tekstil esaslı takviye katmanlarının kullanımının potansiyel faydalarına işaret etmekte olup ileride balata tasarımlarında sürtünme stabilitesini geliştirmek için bu yaklaşımın değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Fren balatası, aramid elyaf, tribolojik performans

1. GİRİŞ

Otomotiv fren sistemleri, bir aracın güvenli şekilde yavaşlatılması ve durdurulması için kritik önem taşır. Fren balataları ve diskleri arasındaki sürtünme malzemeleri, hareket enerjisini ısı enerjisine dönüştürerek frenlemeyi sağlar. Etkili bir fren balatası malzemesi, farklı çalışma koşullarında (değişen yük, hız, sıcaklık ve ıslak/kuru durumlar dahil) mümkün olduğunca sabit bir sürtünme katsayısı üretebilmelidir. Ayrıca düşük aşınma, yüksek ısıl kararlılık, düşük gürültü ve titreşim gibi bir dizi istenen özelliğe de sahip olmalıdır [1]. Ancak tüm bu özelliklerin tek bir malzemede toplanması imkânsıza yakındır. Bu nedenle modern fren balataları, bu çelişkili gereksinimleri dengelemek amacıyla genellikle 10–15 farklı bileşenden oluşan kompozit yapıdadır. Bağlayıcı reçine, takviye edici lifler, sürtünme düzenleyici katkıları (katı yağlayıcılar, aşındırıcılar vb.) ve dolgu malzemeleri gibi bileşenlerin dikkatli formülasyonu ile istenen tribolojik özellikler elde edilmeye çalışılır [2].

Geçmişte fren balatalarında asbest lifi yaygın bir takviye malzemesi olarak kullanılmış ancak sağlık riskleri nedeniyle 1980'lerden itibaren yasaklanmıştır. Günümüzde asbestsiz organik balatalarda (NAO tip) asbest yerine çelik yünü gibi metallerin yanı sıra karbon, cam ve aramid (Kevlar) gibi lifler yapısal takviye ve sürtünme düzenleyici olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu lifler, balatanın mekanik dayanımını artırmanın yanı sıra, yüksek sıcaklıklarda performansı iyileştirmek, sürtünmeyi stabilize etmek, aşınma ve gürültüyü azaltmak gibi işlevler de görebilir [1]. Örneğin aramid elyaf, fren balatası kompozitlerinde özellikle öne çıkan bir takviyedir; literatürde aramid lifinin balatalarda sürtünme kararlılığını artırdığı ve aşınma direncini iyileştirdiği bildirilmektedir. Aramid lifler, yumuşak ve ısıya dayanıklı yapıları sayesinde yüksek sıcaklıklarda dahi sürtünme yüzeyinde kararlı bir film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısındaki dalgalanmaları azaltabilmektedir [2]. Diğer taraftan cam elyafları da balata yapılarında sık kullanılan takviyelerdendir; cam elyaf, sert ve kırılğan yapısıyla sürtünme esnasında mikro-pençeler gibi davranarak sürtünme katsayısını yükseltebilmekte ve balata aşınmasını azaltabilmektedir. Nitekim bir çalışmada, cam elyaf takviyeli fren malzemelerinin daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma oranı sergilediği, bunun da cam liflerin yüzeyde biriken kararlı bir üçüncü gövde (sürtünme filmi) oluşturmasıyla ilişkili olduğu belirtilmektedir [3].

Balata performansını geliştirmek için yeni malzeme yaklaşımlarından biri de tekstil esaslı ara katmanlar kullanmaktır. Örneğin, dokunmuş (örgü) haldeki fiber kumaşlar uygun reçinelerle empregne edilerek fren balatası astarı olarak kullanılabilir. Nitekim endüstride cam elyaf iplikleri ve pirinç tellerden dokunmuş reçine emdirilmiş balata astarları mevcuttur ve yüksek dayanım ile uzun ömür sunmaktadır [4]. Bu tür dokuma fren astarları, özellikle tambur frenlerde ve ağır hizmet uygulamalarında kullanılmakta ve sürtünme kararlılığına katkı sağlamaktadır. Bu bilgiler ışığında, çalışmamızda disk fren balatası yüzeyine entegre edilen ince bir aramid elyaf kumaş katman ile cam elyaf kumaş katmanının, balatanın sürtünme davranışına ve aşınma direncine etkileri araştırılmıştır. Bu yenilikçi yaklaşım ile liflerin balata yüzeyinde sürekli bir ağ oluşturmasının sürtünme kararlılığı üzerinde nasıl bir etkisi olacağı ortaya konulmaya çalışılmıştır. Çalışma

kapsamında hazırlanan numuneler pin-on-disk tribometre testleri ile değerlendirilmiş; sürtünme katsayısının zamanla değişimi, aşınan malzeme miktarı ve yüzey sıcaklığı ölçülerek aramid ve cam elyafli ara tabakaların fren balatası performansına katkıları tartışılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Numune hazırlanması: Çalışmada fren balataları için üç tip numune üretilmiştir: (i) standart balata numunesi: ticari bir NAO (asbestsiz organik) balata formülasyonu referans alınarak, fenolik reçine bağlayıcı ve çeşitli fiber, dolgu ve sürtünme katkıları içeren bir kompozit malzeme hot-press yöntemiyle kalıplanmıştır. (ii) aramid elyaf ara tabakalı balata: aynı balata kompozisyonu, sürtünme yüzeyine yakın konumda ince bir aramid kumaş tabaka entegre edilerek imal edilmiştir. Aramid kumaş olarak düz dokuma Kevlar® tekstil (0.2 mm kalınlığında) kullanılmıştır. Bu kumaş tabaka, balata karışımı kalıba alınmadan önce kalıp yüzeyine yerleştirilmiş ve reçine ile empregne olacak şekilde balata malzemesi ile birlikte sıcak preslenerek bütünleşik bir yapı oluşturulmuştur. (iii) Cam elyaf ara tabakalı balata: benzer şekilde, sürtünme yüzeyine cam elyaf dokuma kumaş (ince cam fiber bez) yerleştirilerek imal edilmiştir. Tüm numuneler 40×40×6 mm boyutlarında plakalar olarak preslenmiş, ardından $\phi=10$ mm boyutunda test örnekleri bu plakalardan kesilmiştir. Hazırlanan numunelerin sürtünme yüzeyleri 320 grit zımpara ile hafifçe taşlanarak eşitlenmiş ve test öncesi yüzeyler etil alkol ile temizlenmiştir.

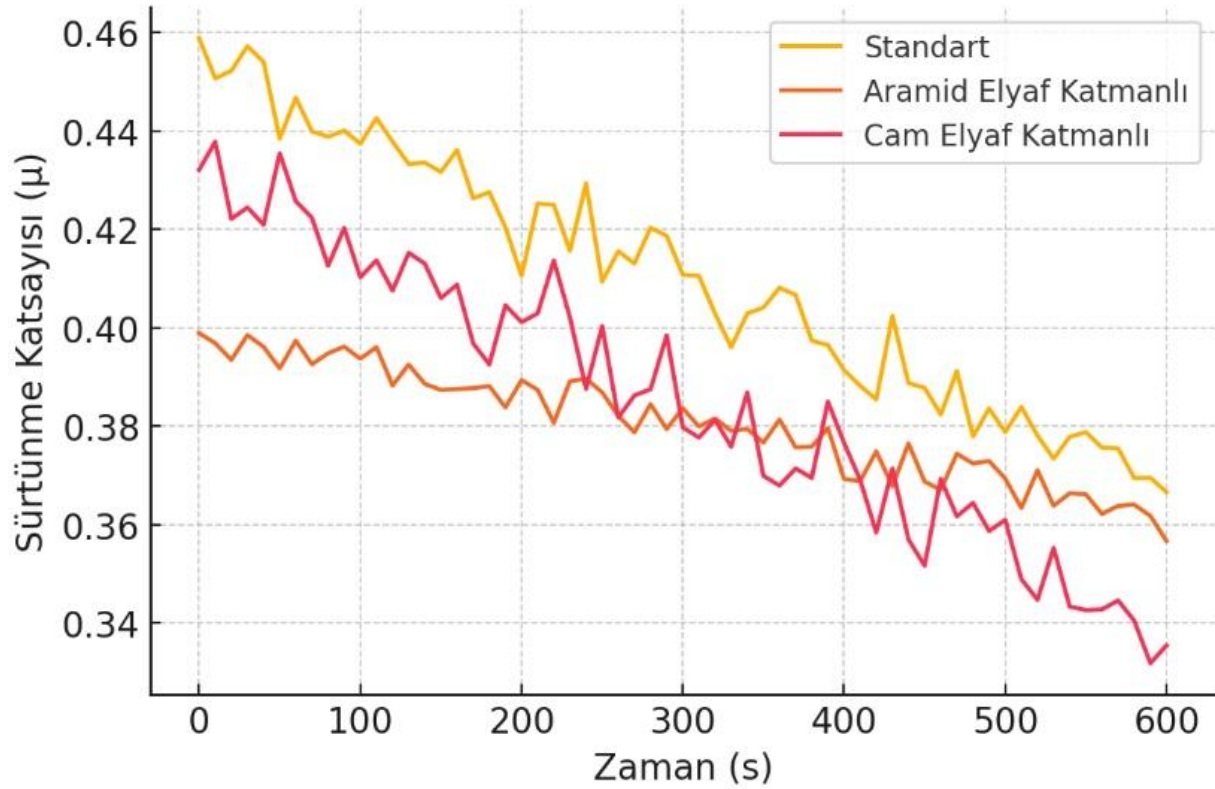
Test düzeneği ve koşulları: Sürtünme ve aşınma testleri pin-on-disk tipinde bir tribometre üzerinde gerçekleştirilmiştir. Disk olarak tipik bir fren diski malzemesi olan grafit dökme demir (pik döküm, %3.3 C) kullanılmıştır. Dökme demir disk yaklaşık 100 mm çapında ve 10 mm kalınlığındadır (HB 180 sertlik). Pin olarak hazırlanan balata numuneleri disk üzerine dik olarak belirli bir kuvvet ile bastırılmış ve disk döndürülerek sürtünme sağlanmıştır. Tüm testlerde oda sıcaklığında kuru koşullar kullanılmıştır (bağıl nem %50). Uygulanan normal yük 20 N olarak seçilmiştir (1.5 MPa ortalama yüzey basıncı). Disk dönme hızı 200 d/dk olarak ayarlanmış, bu da disk dış çapında yaklaşık 1 m/s çevresel kayma hızına tekabül etmektedir. Her bir deney süresi 10 dakika olarak belirlenmiş, bu süre boyunca pin ile disk arasındaki sürtünme kuvveti yük hücresi ile sürekli ölçülerek sürtünme katsayısı (μ) gerçek zamanlı olarak hesaplanmıştır. Test sırasında disk ile numune arasındaki temas bölgesi yakınında bir termokupl yardımıyla anlık yüzey sıcaklığı izlenmiş ve maksimum sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Her bir numune tipi için en az üç tekrar testi yapılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Aşınma ölçümleri: Deney öncesinde tüm pin numuneler hassas terazide (± 0.1 mg) tartılmış, test sonunda yeniden tartılarak kütle kaybı hesaplanmıştır. Sürtünme testleri sonrasında numunelerin aşınmış yüzeyleri stereo mikroskop altında gözlemlenerek aramid ve cam elyafların aşınma davranışına etkileri nitel olarak değerlendirilmiştir.

3. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Sürtünme katsayısının zamanla değişimi: Görsel 1’de standart ve tekstil ara tabakalı balata numunelerinin sürtünme katsayısı (μ) ile zaman grafikleri verilmiştir. Standart balata numunesi, teste ilk başta $\mu \approx 0.45$ gibi göreceli yüksek bir sürtünme katsayısı ile başlamış, ardından ilk birkaç dakika içinde sürtünmede bir miktar azalma eğilimi gözlenmiştir. Test sonunda standart numunenin sürtünme katsayısı 0.37 seviyesine inmiştir. Buna karşın aramid elyaf ara tabakalı numune, başlangıçta 0.40 civarında bir sürtünme katsayısı üretmiş ve test boyunca bu değeri etrafında oldukça kararlı bir seyir izlemiştir. 10 dk sonunda aramid takviyeli numunenin sürtünme katsayısı yaklaşık 0.36 değerine ulaşarak başlangıca kıyasla sadece 0.04’lük küçük bir düşüş sergilemiştir. Cam elyaf katmanlı numune ise ilk sürtünme değeri 0.43 ile standart numuneye benzer bir seviyede başlamış olmasına rağmen sürtünme katsayısı zamanla daha belirgin bir azalma göstermiş ve test bitiminde 0.34 değerine kadar düşmüştür. Üç numune arasında cam elyafli olan, sürtünme katsayısındaki düşüşün en belirgin olduğu durumdur. Ayrıca, Görsel 1’den görülebileceği gibi sürtünme katsayısındaki anlık dalgalanmalar (titreşimler) açısından da numuneler arasında farklar bulunmaktadır: Aramid elyaf ara tabakalı numunenin μ -t grafiği en düzgün seyri gösterirken, cam elyafli ve standart numunelerde sürtünme katsayısında daha belirgin küçük dalgalanmalar meydana

gelmiştir. Bu durum, aramid ara tabakasının sürtünme sırasında oluşan mikro titreşimleri ve salınımları sönmlemede daha etkili olduğunu düşündürmektedir.



Görsel 1. Farklı balata numuneleri için sürtünme katsayısının zamana göre değişimi (pin-on-disk testi, 20 N, 1 m/s, oda sıcaklığı)

Yukarıdaki gözlemler, aramid elyaf içeren ara tabakanın fren balatası yüzeyinde sürtünme stabilitesini artırdığına işaret etmektedir. Aramid takviyeli numunenin sürtünme katsayısı, test süresince neredeyse sabit kalmış ve standart numuneye kıyasla çok daha düşük bir oranda azalmıştır. Cam elyaf ara tabakalı numunede ise sürtünme katsayısının zamanla düşüş eğilimi göstermesi, bu malzemenin sürtünme solması (fade) davranışına karşı aramid kadar direnç gösteremediğini göstermektedir. Bunun olası nedeni, cam elyafın daha sert ve kırılkan olması sebebiyle sürtünme sırasında daha agresif bir aşınma mekanizması yaratması ve yüzeyde oluşan sürtünme filminde sürekliliğin bozulması olabilir. Bu çalışmada test sıcaklıkları nispeten düşük olsa da, cam elyafların mikro ölçekte kırılması ve parçalanması sonucunda yüzeyde oluşan üçüncü gövde tabakasının kararlılığının, aramid liflerine kıyasla daha zayıf olduğu düşünülebilir.

Aşınma ve yüzey sıcaklığı: Deneyler sonrasında numunelerin kütle kaybı ölçümleri Çizelge 1’de verilmiştir. Standart balata numunesi en yüksek aşınmayı göstermiş; 10 dakikalık test sonunda ortalama 60 mg malzeme kaybına uğramıştır. Aramid elyaf ara tabakalı numunenin aşınma miktarı ise belirgin biçimde daha düşüktür: Yaklaşık 30 mg kütle kaybı ile standart numunenin yarısı kadar aşınma gözlenmiştir. Cam elyaf ara tabakalı balata numunesi ise 45 mg civarında aşınma ile aramid katkılı ile standart numune arasında bir değer almıştır. Bu sonuçlar, aramid takviyesinin aşınma direncini artırmada cam elyafa kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir. Aramid lifleri,

yumuşak yapıları sayesinde hem üçüncü gövde tabakasını daha sürekli kılmakta hem de aşındırıcı parçacık oluşumunu azaltarak balata yüzeyini korumaktadır. Cam lifleri ise kırılarak yüzeyde kalıcı platolar oluştursa da bu kırılma esnasında oluşan sert parçacıklar bir miktar aşındırıcı etki yaratabilir. Ayrıca aramid liflerinin matrise tutunması cam liflere göre daha iyidir; liflerin çekilip kopması zor olduğu için malzeme kaybı azalır. Cam liflerde ise aderans zayıfsa lif kopup ayrılabilir veya kırık cam parçacıkları koparak balatadan uzaklaşabilir. Bu mekanik farklılıklar, aramid ve cam elyaf katkılarının aşınma miktarına yansıyan farklı etkilerini açıklayabilir.

Yüzey sıcaklığı verileri incelendiğinde, cam elyaflı numunenin test esnasında en yüksek sıcaklığa ulaştığı görülmüştür (yaklaşık 130 °C). Standart numune 125 °C maksimum yüzey sıcaklığına erişirken, aramid elyaflı numunenin en yüksek sıcaklığı 115 °C ile diğerlerine göre daha düşük kalmıştır. Bu fark, cam elyaflı numunenin özellikle testin ilk başındaki yüksek sürtünme düzeyi nedeniyle daha fazla ısı üretmesine bağlanabilir. Aramid elyaflı numunede ise sürtünme katsayısının biraz daha düşük ve stabil olması ile aramid liflerin ısı iletkenliğinin düşüklüğü (izolatör özelliği) birleşerek yüzey sıcaklığının aşırı yükselmesini engellemiştir. Öte yandan, aramid liflerin ısıya dayanımı da yüksektir (aramid elyaf 500 °C'nin üzerinde ayrılmaya başlar), bu nedenle test boyunca yapısal bütünlüklerini koruyarak balata yüzeyinde ısıdan kaynaklı performans kaybını minimize etmiş olabilirler. Cam elyaf ise 600 °C civarında yumuşamaya başlasa da, daha kırılğan olduğu için artan sıcaklıklarda yapıdan koparak ayrılabilir; ancak bizim test sıcaklıklarımız bu seviyelere ulaşmadığından esas etki lif kırılğanlığından ziyade sürtünme seviyesinin yüksekliğiyle ilgilidir.

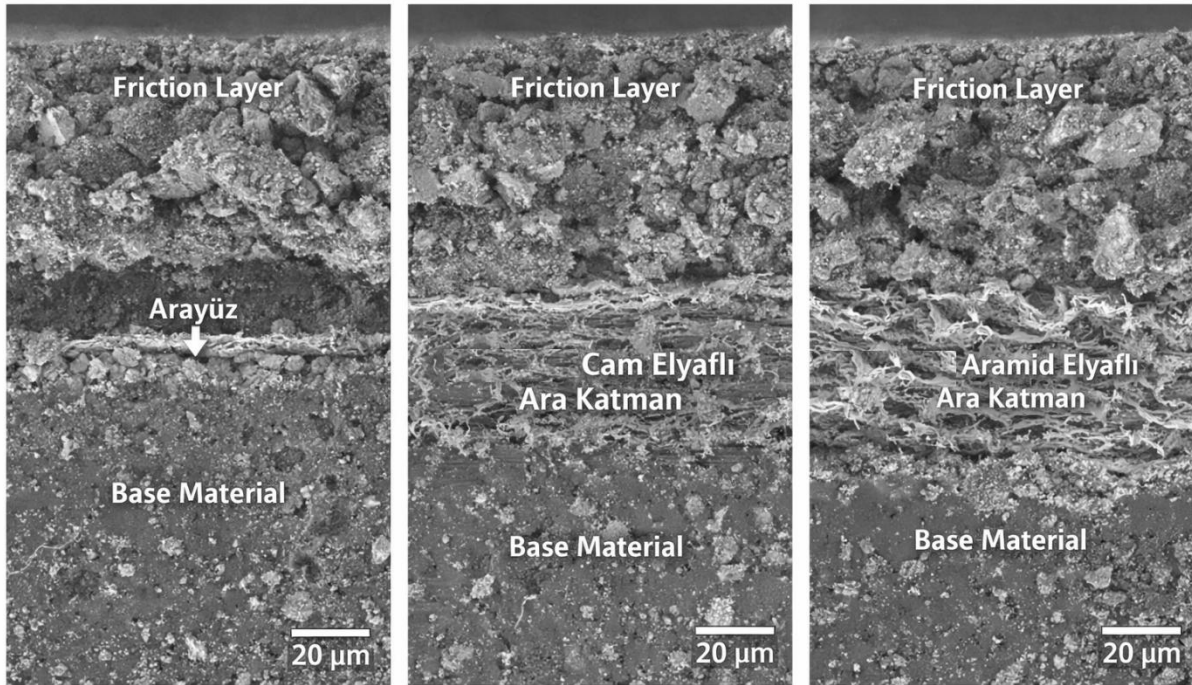
Çizelge 1. Farklı numuneler için ortalama sürtünme katsayısı (μ), aşınma miktarı ve maksimum yüzey sıcaklığı sonuçları

Numune	Ortalama μ	Aşınma (mg)	Maks. sıcaklık (°C)
Standart balata	0.41	60	125
Aramid elyaf	0.38	30	115
Cam elyaf	0.39	45	130

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde, aramid elyaf ara tabaka uygulamasının balatanın hem sürtünme hem de aşınma performansını olumlu etkilediği görülmektedir. Aramid katkılı balatanın ortalama sürtünme katsayısı, standart balata ile benzer seviyede olmakla birlikte (bir miktar daha düşük) oldukça stabil bir değerdir. Bu numunenin aşınma miktarı açık ara en düşüktür. Cam elyaflı balata ise ortalama sürtünme katsayısı bakımından standart balata ile benzer veya hafif daha yüksek bir değer yakalamış, ancak bu değeri koruyamayarak sürtünme performansında düşüş yaşamıştır; buna rağmen aşınma açısından standart balataya göre daha iyi performans göstermiştir.

Mikroyapı gözlemleri: Deney sonrası balata numunelerinin aşınmış yüzeylerine SEM altında bakıldığında (Görsel 2), aramid elyaf içeren tabakanın yüzeyinde kesintisiz bir film ve yapışık aşınma kalıntıları gözlenmiştir. Aramid liflerin çoğunlukla matris içinde tutulduğu, yüzeyde ergimiş reçine ve ince artıklarla birlikte lif uçlarının görülebildiği

tespit edilmiştir. Bu, aramid liflerinin aşınma sırasında yapıyı bir arada tutarak sürtünme filmine katkı sağladığını göstermektedir. Cam elyaflı numunede ise yüzeyde daha parlak ve düzleşmiş bölgeler dikkat çekmiştir. Muhtemelen sürtünme sırasında cam liflerin bir kısmı ufalanarak yüzeyde sert bir film tabakası oluşturmuştur. Ancak bizdeki cam elyaflı yüzeyde, kırılmış cam parçacıklarının oluşturduğu film tabakasının yer yer disk yüzeyinin metalik parlaklığı ile karışık bir mozaik desen oluşturduğu görülmüştür. Bu da cam lif kaynaklı üçüncü gövde tabakasının aralıklarla koparak yenilendiğine, dolayısıyla sürtünmenin aramid kadar pürüzsüz olmadığına işaret eder. Özetle, aramid elyaf yapışkan ve sünek doğasıyla aşınma esnasında bir ağ gibi davranıp sürtünme yüzeyini stabilize ederken, cam elyaf sert ve kırılğan yapısıyla yüksek sürtünme sağlamakla birlikte bu sürtünmeyi tam stabilize edememektedir. Yine de her iki takviye de toplam aşınma miktarını azaltmış, bu da metal disk yüzeyinin korunmasına yardımcı olabilecek olumlu bir gelişmedir.



(a) Standart Numune

(b) Aramid Elyafli Katmanlı Numune

(c) Cam Elyafli Katmanlı Numune

Görsel 2. Numunelerin karşıt yüzey ile etkileşimlerinin SEM görüntüleri

4. GENEL DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

Bu çalışmada fren balatası sürtünme yüzeyine entegre edilen aramid ve cam elyaflı ince tekstil ara tabakalarının sürtünme stabilitesine etkileri incelenmiştir. Elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenebilir:

- Aramid elyaf ara tabakası, fren balatasının sürtünme katsayısının zamanla daha sabit kalmasını sağlamıştır. Aramid takviyeli numune, 10 dakikalık test boyunca sürtünme performansını neredeyse korumuş, sürtünme katsayısında minimum düzeyde bir düşüş

yaşanmıştır. Bu, frenleme sırasında tutarlı ve öngörülebilir bir sürtünme kuvveti elde etmek açısından önemli bir kazanımdır.

- Cam elyaf ara tabakası kullanımı, başlangıçta yüksek bir sürtünme katsayısı değeri sağlasa da sürtünme katsayısındaki düşüşü engellemede aramid kadar etkili olmamıştır. Cam elyaf takviyeli balata, test sonuna doğru belirgin bir *fade* yaşayarak sürtünme katsayısında düşüş göstermiştir. Bununla birlikte, cam elyaf katkısı da aşınma miktarını azaltmış, standart balataya kıyasla daha iyi bir aşınma direnci sunmuştur.
- Aşınma sonuçları, aramid elyafli tekstil katmanın balata malzemesinin aşınma direncini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Aramid takviyesi, numunede yarı yarıya daha az malzeme kaybı ile sonuçlanmıştır. Bu durum, fren balatasının servis ömrünü uzatmak ve bakım sıklığını azaltmak açısından avantaj sağlayabilir. Cam elyafli katman da aşınmayı bir miktar azaltmıştır ancak etkinliği aramid kadar yüksek değildir.
- Aramid ve cam elyaf ara tabakaları, balata yüzeyinde farklı etki mekanizmaları sergilemektedir. Aramid lifler, sürtünme sırasında yapıyı bir arada tutan sünek bir ağ gibi davranarak kararlı bir sürtünme filmi oluşturmakta, mikro düzeydeki titreşim ve dalgalanmaları sönmölemektedir. Cam lifler ise sert plakalar şeklinde yüzeyde kalarak sürtünmeye katılmakta ve yüksek başlangıç sürtünmesi sağlamaktadır; ancak kırılma noktaları nedeniyle süreklilikleri kısmen sınırlı kalmaktadır.
- Yüzey sıcaklığı ölçümleri, aramid takviyesinin balata yüzey sıcaklığını bir miktar düşürdüğünü, cam takviyenin ise başlangıçta daha fazla ısı ürettiğini göstermiştir. Daha kararlı sürtünme sayesinde aramid katman, ısı birikimini de azaltarak olası termal sorunları hafifletebilir.
- Sonuç olarak, aramid elyafli ince tekstil ara tabaka, fren balatası uygulamalarında sürtünme stabilitesini iyileştirmek ve aşınmayı azaltmak için umut vaat eden bir yöntemdir. Bu çalışmanın bulguları, özellikle yüksek performans ve güvenilirlik gerektiren fren sistemlerinde (örneğin elektrikli araçlar veya ağır taşıtlarda) balata yüzeyine entegre lifli katmanların kullanımının potansiyel faydalarını ortaya koymaktadır.

Öneriler ve gelecekteki çalışmalar: İlerleyen araştırmalarda farklı tip ve kalınlıktaki tekstil ara tabakalar (örneğin karbon elyaf, bazalt elyaf veya hibrit dokuma yapılar) incelenebilir. Ayrıca, bu çalışmada tek bir sabit yük ve hızda yapılan testlerin yerine, gerçekçi frenleme senaryolarını yansıtmak üzere değişken sıcaklık, basınç ve hız koşullarında (örneğin fren fade ve recovery testleri) aramid/cam ara tabakalı balataların performansı değerlendirilmelidir. Ara tabakanın balata malzemesine bağlantı dayanımı ve uzun süreli termal dayanımı da kritik olduğundan, ara yüzey aderansı ve yorulma davranışı gelecekte incelenmesi gereken konular arasındadır. Uygulama açısından, üretim sürecine entegre edilecek böyle bir tekstil katmanın maliyet ve üretilebilirlik boyutu da değerlendirilmeli, optimal tasarım parametreleri belirlenmelidir. Son olarak, fren balatası

aşınmasıyla ortama yayılan partiküllerin boyut ve toksisite özellikleri üzerinde lifli ara tabakaların bir etkisi olup olmadığı da çevresel faydalar yönünden araştırılmaya değerdir.

KAYNAKÇA

- [1] Essam, M. A., Abdeltawab, N. M., Shash, A. Y., El-Sayed, M. M. Investigation of mechanical properties and performance of automotive brake pads. Scientific Reports, 15(1), 32218, 2025.
- [2] Aranganathan, N., Mahale, V., Bijwe, J. Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests, Wear, 354–355, 69–77, 2016.
- [3] Monreal-Pérez, P., Lopez, D., Sola, I., Erroz, P. The role of glass fiber morphology on the friction behavior and wear mechanism of low steel-NAO hybrid railway brake shoes. Tribology International, 178, 108079, 2022.
- [4] <https://www.frenossaulea.com/woven> (Erişim tarihi: 23.01.2026).

**PET BAZLI OTOMOTİV KOLTUK KUMAŞINDA UYGULANAN HALOJENLİ ve
HALOJENSİZ ALEV GECİKTİRİCİ BİTİM İŞLEMLERİNİN YANICILIK ve
DUMAN PERFORMANSINA ETKİLERİ**

Doç.Dr., Özlem ERDEM YILMAZ

Çukurova Üniversitesi

ozlemerdem@cu.edu.tr - 0000-0002-0976-2162

Doç.Dr., Ali Can YILMAZ

Çukurova Üniversitesi

acyilmaz@cu.edu.tr - 0000-0001-9832-9880

ÖZET

Otomotiv koltuk döşemelerinde yangın güvenliği açısından alev geciktirici özellik zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmada, %100 PET (polyester) bazlı bir otomotiv koltuk kumaşına uygulanan halojen içerikli ve halojen içermeyen iki farklı alev geciktirici bitim işleminin kumaşın yanıcılık davranışı (alev alma/sona erme performansı) ve duman yoğunluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmada kumaş numunelerine (1) bromlu bileşik esaslı halojenli alev geciktirici apre ve (2) fosfor/azot esaslı halojensiz alev geciktirici apre uygulanmış; ayrıca apresiz kontrol numunesi referans olarak kullanılmıştır. Tüm numuneler sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) testi, dikey yanma testi (alev sönme ve koruma süreleri ölçülerek) ve duman yoğunluğu testi (NBS duman odası) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre halojenli apre uygulanan kumaşın LOI değeri kontrol numuneye kıyasla belirgin şekilde yükselerek %21'den %28'e çıkmış, dikey yanma testinde numune kendiliğinden sönerken alev sönme süresi ihmal edilebilir düzeye inmiştir. Halojensiz apre uygulanan kumaşta LOI %26'ya yükselmiş ve numune yine kendiliğinden sönmüştür; ancak halojenli sisteme kıyasla bir miktar daha uzun bir süre (yaklaşık 2–3 sn) yanmaya devam etmiştir. Duman testi sonuçları, halojenli alev geciktiricinin yanma sırasında en yüksek duman yoğunluğunu oluşturduğunu, halojensiz sistemin ise duman oluşumunu belirgin biçimde azalttığını göstermiştir. Genel olarak her iki alev geciktirici bitim işlemi de kumaşın tutuşma direncini artırarak dikey yanma test kriterlerini sağlamış, ancak halojen içermeyen sistem daha düşük duman ve toksik gaz üretimiyle öne çıkmıştır. Sonuçlar, otomotiv tekstillerinde halojensiz alev geciktiricilerin yangın güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından avantajlı bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alev geciktirici bitim, otomotiv koltuk kumaşı, duman yoğunluğu

1. GİRİŞ

Otomotiv iç döşeme tekstilleri, olası bir araç yangınında alev yayılımını sınırlamak ve yolcu güvenliğini artırmak amacıyla belirli yanmazlık/alev geciktiricilik kriterlerini sağlamalıdır [1]. Polyester (PET) koltuk kumaşları düşük LOI değerleri nedeniyle ortam havasında kolay tutuşabilen malzemeler sınıfındadır ve bu nedenle kimyasal bitim işlemleri ile güç tutuşur hale getirilmesi yaygın bir uygulamadır [2]. Alev geciktiricilik performansı çoğunlukla LOI, dikey yanma (afterflame/afterglow) ve duman yoğunluğu gibi standart metriklerle değerlendirilir; pratikte malzemenin yalnızca alev almayı geciktirmesi değil, aynı zamanda duman üretimini de sınırlaması kritik kabul edilir.

Alev geciktirici sistemler genel olarak halojenli ve halojensiz olarak sınıflandırılmaktadır. Halojenli (özellikle bromlu/klorlu) sistemler gaz fazında radikal yakalama mekanizmasıyla yüksek etkinlik sağlasa da yanma sırasında yoğun duman ve koroziv/toksik gaz oluşumu açısından dezavantajlıdır [3]. Halojensiz (fosfor/azot esaslı) sistemler ise çoğunlukla katı fazda kömürleşme/şişme ile bariyer oluşturup ısı ve kütle transferini kısıtlayarak yanmayı baskılar; bu yaklaşımın duman yoğunluğunu azaltma potansiyeli literatürde sık vurgulanmaktadır [4]. Bu çalışma, PET bazlı otomotiv koltuk kumaşında halojenli ve halojensiz iki bitim sisteminin LOI, dikey yanma ve duman yoğunluğu ölçütleri açısından karşılaştırmalı performansını deneysel olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Malzeme: Çalışmada kullanılan kumaş, otomotiv koltuk döşemelerinde yaygın olarak tercih edilen %100 polyester (PET) esaslı bir döşemelik kumaştır. Kumaş düz dokuma yapıda olup yaklaşık 300 g/m² yüzey yoğunluğuna ve LOI $\approx$ 21% değerine sahiptir (apre uygulanmamış ham hali yanıcılığa açıktır). Kumaş numuneleri 30 cm $\times$ 30 cm boyutlarında kesilerek deneylerde kullanılmıştır.

Alev geciktirici bitim işlemleri: Kumaşlara biri halojen içeren, diğeri halojen içermeyen iki farklı alev geciktirici kimyasal apre uygulanmıştır. Halojenli sistem, brom bazlı organik bir alev geciktirici katkı (dekabromodifenil etan) ile antimon trioksit sinerjik ajanının kombinasyonunu içermektedir. Bu halojenli apre formülasyonu, su bazlı bir bağlayıcı polimer (akrilik dispersiyon) içerisinde %10 aktif solid madde olacak şekilde hazırlanmıştır. Halojensiz sistem ise fosfor ve azot içeren organik bir alev geciktirici (amonyum polifosfat ve melamin türevleri kombinasyonu) içermektedir. Halojensiz apre formülü de benzer şekilde su bazlı bir polimerik bağlayıcı içinde %15 toplam katı madde oranında hazırlanmıştır. Her iki apre kimyasalı, üretici tavsiyelerine göre tartılarak karıştırılmış ve kumaşlara empirme (pad-dry-cure) yöntemiyle uygulanmıştır. Empirme işlemi sırasında kumaşlar hazırlanan apre çözeltilerine daldırılıp çıkarıldıktan sonra 2 bar sıkma basıncı ile fazla çözelti alınmış, ardından 110°C’de 5 dakika kurutulmuş ve 150°C’de 3 dakika fikse edilmiştir. İşlem sonunda kumaş numunelerinde yaklaşık %8 oranında halojenli kimyasal fikse olurken, halojensiz formülasyonda %10 civarında bir kimyasal fikse oranı elde edilmiştir (farklı özgül ağırlık ve viskozite nedeniyle halojensiz aprede biraz daha yüksek add-on oluşmuştur). Hazırlanan numune grupları: Kontrol

(K) – apre uygulanmamış ham PET kumaş; Halojenli FR (H) – halojenli apre uygulanmış kumaş; Halojensiz FR (HZ) – halojen içermeyen apre uygulanmış kumaş şeklindedir.

Test yöntemleri: Apre uygulanmış ve kontrol numunelerin yanma davranışını nicel olarak değerlendirmek üzere üç farklı test gerçekleştirilmiştir.

(i) LOI testi: ASTM D2863 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu testte, dikey yönde tutulan 150×50 mm boyutlarındaki numune, üst kenarından tutuşacak şekilde yakılır ve etrafından geçen oksijen/azot gaz karışımındaki oksijen yüzdesi yavaş yavaş azaltılarak numunenin kendi kendine yanmayı sürdürmeyi kestiği en düşük oksijen konsantrasyonu belirlenir. Her bir numune grubu için üç tekrar testi yapılarak ortalama LOI değeri hesaplanmıştır.

(ii) Dikey yanma testi: ASTM D6413 standardı protokolü izlenerek yapılmıştır. 300×75 mm ebatlarında dikey olarak asılmış numunenin alt kenarı, standart boyutta bir alev ile 12 saniye süreyle yakıcı aleve maruz bırakılmıştır. Bu süre sonunda numuneye uygulanan alev çıkarılmış ve numunenin yanmaya devam ettiği süre kronometre ile ölçülmüştür (afterflame, alev sönme süresi). Ayrıca numunenin kor halinde yanmaya (közlenmeye) devam ettiği süre (afterglow, korlaşma süresi) ayrı olarak kaydedilmiştir. Test sırasında eriyerek damlama olup olmadığı ve numunenin yanma sonucu ne kadar uzunlukta kömürleştiği (char uzunluğu) de gözlemlenmiştir. Her bir numune türü için 5 tekrar yapılarak ortalama afterflame ve afterglow süreleri not edilmiştir.

(iii) Duman yoğunluğu testi: ASTM E662 standardına göre NBS (National Bureau of Standards) duman yoğunluğu odasında gerçekleştirilmiştir. $75 \times 75 \times 3$ mm boyutlarında numune parçaları dikey yerleştirilerek, spesifik bir ısı akısı altında tutuşturulmuş ve kapalı hazne içinde zamanla oluşan dumanın ışık geçirgenliğini azaltma miktarı ölçülmüştür. Test alevli (flaming) koşulda yapılmış (yani numune bir pilot alev ile tutuşturulmuştur) ve 4 dakika sonunda ulaşılan maksimum optik duman yoğunluğu “Ds” değeri kaydedilmiştir. Her bir numune için 3 tekrar yapılarak ortalama maksimum duman yoğunluğu değeri raporlanmıştır.

Elde edilen veriler halojenli ve halojensiz bitim işlemlerinin karşılaştırmalı analizi için kullanılmıştır. Ayrıca, deney sırasında numunelerin yanma esnasındaki davranışları (alev alma şekli, damlama, duman rengi vb.) nitel olarak gözlemlenmiş ve not edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yanıcılık testleri sonuçları (LOI ve dikey yanma): Kontrol grubundaki apresiz PET kumaşın LOI değeri ortalama %21 olarak ölçülmüştür. Bu düşük değer, polyester malzemenin normal hava atmosferinde kolaylıkla alev alacağını doğrulamaktadır. Nitekim kontrol numunesi dikey yanma testinde ilk tutuşma sonrasında dış alev kaynağı uzaklaştırıldığında da yanmaya devam etmiş ve numunenin tamamı birkaç saniye içinde yanarak tüketmiştir (alev sönme süresi ~10 saniye, detaylı değerler Çizelge 1’de verilmiştir). Alev geciktirici bitim işlemleri sonrasında ise LOI değerlerinde belirgin artışlar elde edilmiştir. Halojenli apre uygulanmış numunenin LOI değeri %28 olarak bulunmuştur. Bu değer, malzemenin oksijen atmosferi yaklaşık %28’in altına düşmedikçe kendi kendine yanmayı sürdüremeyeceğini gösterir ki, bu da halojenli apreli kumaşın artık güç tutuşur sınıfa geçtiğini teyit etmektedir. Halojensiz apre uygulanmış numunenin LOI değeri ise %26 olarak ölçülmüştür. LOI’nin %26 seviyesine çıkarılması

literatürde tipik olarak kendiliğinden sönme eşiği olarak verilmektedir [2]. Bu durumda halojensiz apreli kumaş da kritik eşiği sağlayarak güç tutuşur hale gelmiştir, ancak halojenli sistem kadar yüksek bir oksijen indeksi sunamamıştır.

Dikey yanma testindeki gözlemler LOI sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Kontrol numune, dikey alev maruziyeti sırasında hızla tutuşmuş ve alev kaynağı çekildikten sonra da önemli bir süre yanmaya devam etmiştir. Yaklaşık 10 saniye boyunca numune alevli yanmayı sürdürmüş, bu esnada eriyen polyester damlacıkları zemine akmıştır. Yanan damlacıklar test platformunda ek yangın yükü oluşturabilecek potansiyele sahiptir; nitekim eriyik damlaması polyester gibi termoplastiklerin yangın riskini artıran bir faktördür. Kontrol kumaş, 10 sn sonunda tamamen tükenerek sönerken geride neredeyse hiç katı kalıntı (kömür) bırakmamıştır. Halojenli FR apreli numune ise alev uygulama süresi sonunda kendiliğinden sönmüş; afterflame (alev sönme süresi) değeri ortalama yalnızca 2 saniye olarak kaydedilmiştir. Bu süre zarfında numune üzerinde alev hızla azalarak sönmüş, yanma yalnızca kumaşın alt kısmında küçük bir kömürleşmiş kısım ile sınırlı kalmıştır. Halojenli apreden dolayı numune alev alır almaz bromlu bileşiklerin gaz fazına geçerek serbest radikalleri baskıladığı ve bu sayede reaksiyonu durdurduğu düşünülmektedir [5]. Halojenli numunede apre kaplaması kumaş yüzeyinde bir bariyer oluşturmuş ancak eriyen kısım küçük damlalar şeklinde akmıştır. Damlalar yanarak düştüğü için test düzeneğinde ikincil yanma görülmüştür. Halojenli numunenin afterglow (korlaşma süresi) değeri “0 saniye” olarak kaydedilmiştir; alev söndükten sonra kumaş közü parlamamış, yanma tamamen sona ermiştir. Numune üzerinde kalan kömürleşmiş uzunluk ~5 cm olup, alev in sadece alt uç kısmında sınırlı kaldığını göstermektedir. Halojensiz FR apreli numune de dikey alev maruziyetine karşı son derece başarılı bir performans sergilemiştir. Alev kaynağı çekildikten sonra ortalama 3 saniye daha alev gözlenmiş ve numune kendiliğinden sönmüştür. Halojensiz formülasyonun içerdiği fosforlu bileşiklerin ısı etkisiyle ayrılarak fosforik asit türevleri oluşturduğu ve bunların da kumaş üzerinde karbonlu bir koruyucu tabaka meydana getirerek alev in yayılmasını durdurduğu düşünülmektedir [6]. Bu numunede alev sönmesinden sonra çok kısa süreli (1–2 sn) bir korlaşma gözlenmiş ancak hızlıca sönmüştür. Halojensiz apreli kumaşın damlama yapmadığı dikkat çekmiştir; muhtemelen oluşan kömür tabakası eriyen polimerin damlamasını kısmen engellemiştir. Kömürleşmiş uzunluk ~8 cm civarında ölçülmüştür ki bu, halojenli numuneye göre biraz daha fazla yanma yayılımı olduğunu gösterse de halen oldukça sınırlıdır. Sonuç olarak her iki alev geciktirici işlem de kumaşın dikey konumda kendi kendine yanma eğilimini ortadan kaldırmış, sadece numunenin alt bölümünde sınırlı bir yanma gerçekleşmiş ve sonlanmıştır. Özellikle halojenli apreli kumaşın dikey yanma test performansı, bir otobüs koltuk kumaşı üzerinde kimyasal işlem uygulanmasıyla elde edilen benzer şekilde düşük yanma hızları ve yüksek LOI değerleri rapor eden literatürle uyumludur [2].

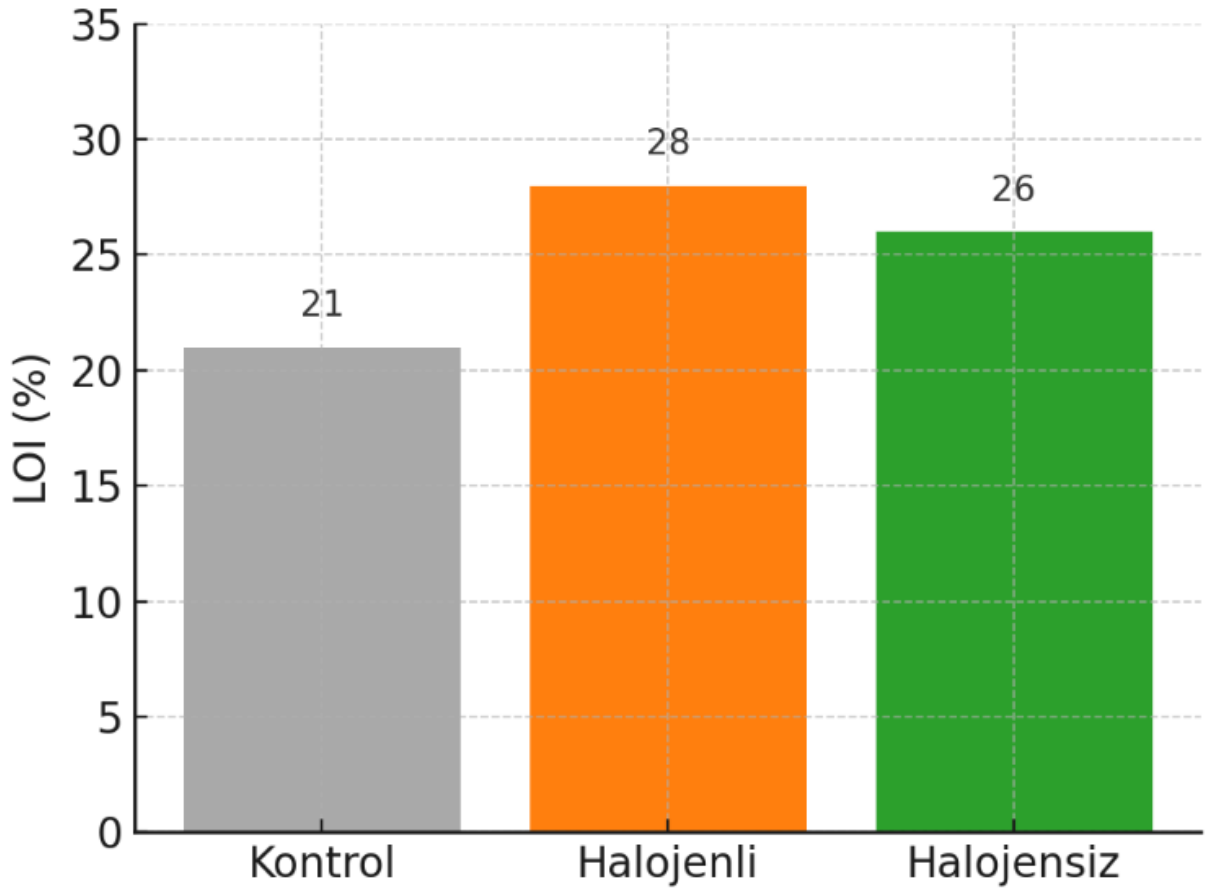
Duman yoğunluğu sonuçları: Farklı numunelerin yangın sırasındaki duman üretme potansiyeli, NBS odası testinden elde edilen maksimum duman yoğunluğu (Ds) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 1’de görüldüğü üzere kontrol numune yanma sırasında oldukça yüksek seviyede duman üretmiştir (Ds ~450). Polyester malzemenin yanmasıyla oluşan duman siyah renkte ve yoğundur; bu beklenen bir durumdur çünkü yanma sırasında polimer yapısı büyük oranda parçalanarak havaya ince karbon parçacıkları (is) ve aromatik bileşikler

yaymaktadır. Halojenli alev geciktirici kullanılmış numune ise en yüksek duman yoğunluğu değerine ulaşmıştır (Ds ~600). Bu dikkat çekici sonuç, halojenli alev geciktiricilerin yanmayı kimyasal olarak bastırırken, yanma verimini düşürmesi ve yoğun is oluşumuna neden olması ile açıklanabilir [3]. Halojenli sistemde alev kısa sürede sönmüş olsa da, alevli yanmanın devam ettiği birkaç saniyelik süre zarfında ciddi miktarda opak duman oluşmuştur. Bromlu/klorlu bileşikler yanma sırasında yakıcı HBr ve HCl gazları da açığa çıkardığından, dumanın optik yoğunluğuna ek olarak toksisiteleri de yüksektir. Bu durum, halojenli alev geciktiricilerin yangın esnasında görüşü engelleyerek tahliyeyi zorlaştırabileceği ve solunum yoluyla zehirlenme riskini artırabileceği anlamına gelir. Halojensiz alev geciktirici uygulanmış numune ise en düşük duman yoğunluğunu sergilemiştir (Ds ~300). Fosfor-azot bazlı şişici sistem, yukarıda değinildiği gibi yanma sırasında koruyucu bir köpüksü kömür tabakası oluşturarak polimerin tamamının yanmasını engellemiş, böylece ortaya çıkan yanma ürünlerini ve is parçacıklarını önemli ölçüde azaltmıştır. Elde edilen Ds değerleri, halojensiz sistemin kontrol numuneye kıyasla yaklaşık %33 oranında daha az duman ürettiğini, halojenli sistemin ise en fazla dumanı ürettiğini göstermektedir.

Çizelge 1. Farklı bitim işlemlerine tabi tutulan PET kumaş numunelerinin LOI, dikey yanma ve duman yoğunluğu test sonuçları (ortalama değerler)

Örnek	LOI (%)	Alev sönme süresi (sn)	Maks. duman yoğunluğu (Ds)
Kontrol (K)	21	10	450
Halojenli FR (H)	28	2	600
Halojensiz FR (HZ)	26	3	300

Yukarıdaki sonuçlar, halojenli sistemin yanıcılık performansını en üst düzeyde iyileştirdiğini ancak duman performansı açısından en olumsuz etkiyi yaptığını göstermektedir. Halojensiz sistem ise yanmayı önlemede biraz daha düşük bir etkinlik gösterse de (birkaç puan daha düşük LOI, 1-2 saniye daha uzun alev sönme süresi) duman ve gaz emisyonları bakımından çok daha avantajlıdır. Görsel 1, her üç numunenin LOI değerlerini grafiksel olarak karşılaştırmaktadır. Kontrol kumaşın LOI'sinin düşük olduğu, her iki alev geciktirici apre sonrası ise değerlerin belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Halojenli sistemin LOI'yi halojensiz sisteme kıyasla bir miktar daha fazla artırdığı, bunun da literatürde halojenli bileşiklerin alev geciktirmede oldukça yüksek gaz-fazı etkinlik göstermesiyle örtüştüğü söylenebilir. Ancak, tekrar vurgulamak gerekirse, halojenli sistemle elde edilen bu kazanım duman oluşumu pahasına sağlanmıştır. Diğer yandan halojensiz sistemin LOI'yi yükseltme mekanizması, polimerin termal bozunmasını değiştirip katı fazda koruyucu katman oluşturması şeklindedir; bu mekanizma yanmayı geciktirmenin yanı sıra dumanı da bastırdığı için özellikle yangın güvenliği açısından daha bütüncül bir koruma sağlamaktadır.



Görsel 1. Farklı bitim işlemlerine tabi tutulan kumaş örneklerinin LOI değerleri

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

PET esaslı otomotiv koltuk kumaşında uygulanan halojenli ve halojensiz alev geciktirici bitim işlemlerinin karşılaştırmalı analizi, her iki yaklaşımın da kendine özgü güçlü ve zayıf yönleri olduğunu ortaya koymuştur. Halojen içeren alev geciktirici sistem, daha düşük oranda kimyasal ile kumaşa yüksek yanmazlık sağlayarak LOI değerini yükseltmiş ve dikey yanma testinde neredeyse sıfır alev süresiyle en iyi sonucu vermiştir. Ancak bu sistem, yanma sırasında yoğun duman ve toksik gaz açığa çıkarması nedeniyle güvenlik ve çevre açısından önemli bir dezavantaja sahiptir. Halojen içermeyen (fosfor-azot bazlı) alev geciktirici ise kumaşın yanıcılığını büyük ölçüde azaltmış, LOI değerini kritik eşiğe ulaştırarak kendi kendine sönmeyi sağlamış ve kabul edilebilir düzeyde bir alev sönme süresiyle başarılı performans göstermiştir. En önemlisi, halojensiz sistem duman yoğunluğunu belirgin biçimde düşürmüş ve zehirli gaz oluşumunu minimize etmiştir.

Bu bulgular ışığında otomotiv koltuk kumaşlarında halojensiz alev geciktirici bitim işlemlerinin daha uygun bir seçenek olduğu değerlendirilmektedir. Halojensiz sistemler, yangın anında sürücü ve yolcuların yoğun dumana maruz kalmasını azaltarak tahliye için daha fazla zaman tanıyabilir ve solunum kaynaklı toksik etkileri minimize edebilir. Ayrıca halojensiz alev geciktiriciler, kullanım ömürleri sonunda araç içi malzemelerin bertaraf edilmesi veya geri

dönüştürülmesi aşamalarında da çevreye daha az zarar verecektir. Halojenli sistemler her ne kadar yüksek alev geciktirme performansı sağlasa da, günümüzün sürdürülebilirlik ve insan sağlığını önceleyen yaklaşımları doğrultusunda otomotiv sektörü halojen içermeyen, çevre dostu alev geciktirici çözümlere yönelmektedir.

Uygulama açısından bakıldığında, halojensiz alev geciktirici formülasyonların maliyet ve işlem kolaylığı konularında da gelişim göstermesi önemlidir. Yeni nesil halojensiz aprelerin yıkama ve aşınma dayanımlarının artırılması, böylece uzun süreli kullanımda dahi koltuk kumaşının alev geciktirici özelliğini koruması gerekmektedir. Gelecekte, nanoteknoloji ve sürdürülebilir kimyasalların entegrasyonu ile halojensiz sistemlerin etkinliğinin daha da artacağı öngörülmektedir. Sonuç olarak bu çalışma, PET bazlı otomotiv tekstillerinde halojenli ve halojensiz alev geciktiricilerin performans farklarını ortaya koyarak, yangın güvenliği ve çevresel açıdan halojensiz sistemlerin uzun vadede daha avantajlı ve tercih edilebilir olduğunu göstermiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Ömeroğulları, Z., Kut, D. Tekstilde güç tutuşurluk. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(1), 27-41, 2012.
- [2] Erdem, Ö., Yılmaz, A. C., Coşgun, A. A new approach for improving flame retardancy of automotive interior upholstery. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 577-584, 2024.
- [3] Bader, M., Lehmann, M., Meyer, M. Phosphorous-based, halogen-free flame retardants for thin, flexible polyurethane artificial leathers. Polymers, 17(7), 841, 2025.
- [4] Turşucular, O. F. Sustainable and eco-friendly flame retardants (FR) in polyester fibers: a review. Journal of Textile Engineering & Fashion Technology, 10(6), 244-249, 2024.
- [5] Shen, J., Liang, J., Lin, X., Lin, H., Yu, J., Wang, S. The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites and their potential application in construction engineering. Polymers, 14(1), 82, 2021.
- [6] Aksoy, K. Epoksi reçinelerde kullanılan alev geciktirici bileşikler. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(2), 775-802, 2023.

**MODIFIED-ATMOSPHERE (NITROGEN-FLUSHED) PACKAGING AND
QUALITY EVOLUTION OF EXTRUDED SNACKS DURING STORAGE**

Selin ÖZTÜRK

Ege University, Institute of Sciences,
Department of Material Science and Engineering, Izmir, Turkey
E-mail: selinkadriov@gmail.com
ORCID ID : 0009-0006-1491-864X

Prof. Dr. FATMA YURT

Ege University, Institute of Nuclear Sciences,
Department of Nuclear Applications, Izmir, Turkey
E-mail : fatma.yurt.lambrecht@ege.edu.tr
ORCID ID : 0000-0002-9394-6908

ABSTRACT

Extruded corn-based chips are highly susceptible to oxidative deterioration and moisture-related changes due to their low moisture content and relatively high fat levels. This study evaluated the performance of transparent and metallized BOPP monolayer films in maintaining the stability of extruded corn chips packaged under nitrogen-based modified atmosphere conditions.

Packaging was performed at laboratory scale using a nitrogen-flushing system. Analyses were conducted on days 0, 15, and 30 of storage. Lipid oxidation was measured using the TBARS (Thiobarbituric Acid Reactive Substances) method. Headspace gas composition was monitored to assess changes in oxygen over time, and moisture content was determined for each sampling day. Packages were initially flushed to achieve a low oxygen level, and variations in headspace oxygen during storage were recorded.

The results demonstrated that metallized BOPP film provided superior oxygen barrier performance compared to transparent BOPP. Samples packaged with metallized BOPP showed a slower increase in headspace oxygen and lower TBARS values throughout storage, indicating reduced lipid oxidation. Furthermore, the metallized film exhibited enhanced moisture control relative to the transparent film.

Overall, the data confirm that packaging barrier properties are essential for maintaining the quality of extruded snack products. Among the films tested, metallized BOPP offered the most effective protection in nitrogen-flushed snack packaging applications.

Keywords: Extruded corn chips, BOPP, metallized BOPP, modified atmosphere packaging, TBARS, headspace oxygen, moisture control

JELKOT KAPLI CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİTMALZEMENİN YÜZEY DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Mak.Müh., Sude MERAL

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

sudemeral688@gmail.com - ORCID ID: 0009-0004-1528-6272

Prof. Dr., Erol FEYZULLAHOĞLU

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

efeyz@kocaeli.edu.tr- ORCID ID: 0000-0003-0739-9643

ÖZET

Bu çalışmada, jelkot kaplı cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozitlerin UV ve ozmotik yaşlanma koşulları altındaki yüzey dayanımlarındaki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler Light Resin Transfer Molding (LRTM) yöntemi ile üretilmiş ve yüzey performansları ASTM D4060 standardına uygun olarak gerçekleştirilen Taber aşınma testi ile değerlendirilmiştir. UV yaşlandırma deneylerinde numuneler belirli süreler boyunca UV ışınımına maruz bırakılmış, ozmotik yaşlandırma deneylerinde ise 80 °C sıcaklıktaki su ortamında bekletilmiştir. Yaşlandırma süresince numuneler periyodik olarak değerlendirilmiş ve aşınma indeksi değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen bulgular, hem UV hem de ozmotik yaşlanmanın jelkot kaplı CTP kompozitlerin yüzey aşınma direncini azalttığını göstermiştir. UV ışınımının jelkot tabakasında foto-oksidatif bozunmaya ve mikro çatlak oluşumuna neden olduğu; ozmotik yaşlanmanın ise su difüzyonu ve plastikleşme etkisi yoluyla yüzey mekanik özelliklerini zayıflattığı belirlenmiştir. Yaşlanma süresi arttıkça aşınma indeksi değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda, her iki yaşlandırma türünün de yüzey dayanımı üzerinde olumsuz etki oluşturduğu, ancak bozunma mekanizmalarının farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, jelkot kaplı CTP kompozitlerin servis ömrünün çevresel koşullardan önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Cam elyaf takviyeli polyester, jelkot, UV yaşlanma, ozmotik yaşlanma, Taber aşınma testi, yüzey dayanımı.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip iki ya da daha fazla bileşenin belirli bir düzen içerisinde birleştirilmesiyle oluşturulan ve tek başına kullanılan malzemelere kıyasla geliştirilmiş mühendislik özellikleri sunan çok fazlı malzemedir. Bu tür yapılarda sistem genellikle yük aktarımını sağlayan bir matris fazı ile mekanik dayanımı artıran takviye elemanlarından oluşmaktadır. Takviye elemanları mekanik dayanımı artırırken, matris fazı yük transferini sağlayarak yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunmaktadır. Takviye elemanı mekanik dayanımı artırırken, matris fazı yük transferini sağlayarak yapısal bütünlüğü korur. Düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım ve korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde kompozitler, günümüzde birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedir [2,3].

Cam elyaf takviyeli polyester kompozitler, termoset karaktere sahip polyester reçinenin cam elyaf takviyeleri ile bir araya getirilmesi sonucu oluşturulan yaygın kompozit malzeme sistemlerinden biridir. Bu yapıda cam lifler yük taşıyıcı eleman olarak görev yaparken, polyester matris fazı lifleri bir arada tutarak dış yüklerin takviye elemanlarına etkin biçimde aktarılmasını sağlamaktadır. CTP kompozitler; üretim süreçlerinin nispeten basit olması, maliyet etkinliği ve çevresel koşullara karşı kabul edilebilir dayanım göstermesi nedeniyle rüzgâr türbini kanatları, boru hatları, deniz yapıları ve otomotiv bileşenleri gibi pek çok endüstriyel alanda kullanılmaktadır [2,3].

Jelkot tabakası, kompozit üretiminde kalıp yüzeyine uygulanan ilk katman olup, nihai ürünün dış yüzeyini oluşturan koruyucu ve estetik bir kaplama görevi görmektedir. Bu katman yalnızca estetik ve düzgün bir yüzey sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ultraviyole ışınları, nem ve çeşitli kimyasal etkilere karşı bariyer görevi üstlenir. Dolayısıyla jelkot tabakasının performansı, kompozit malzemenin yüzey dayanımı ve uzun süreli servis davranışı açısından belirleyici bir faktördür [4,5].

Kompozit malzemelerin yüzey özellikleri, servis ortamında maruz kalınan çevresel ve mekanik etkiler nedeniyle zamanla değişime uğrayabilir. Özellikle UV ışınımı, nem, kimyasal ortamlar ve mekanik aşınma gibi faktörler yüzey performansını olumsuz etkileyebilir. CTP kompozitlerde yüzey dayanımı; aşınmaya, çizilmeye ve çevresel bozunmaya karşı gösterilen direnç ile değerlendirilmektedir. Bu bağlamda jelkot tabakası, hem mekanik hasarları azaltan hem de çevresel etkileri sınırlandıran ilk koruyucu bariyer olarak önemli bir rol oynamaktadır [2,3].

CTP kompozitler kullanım süreleri boyunca ultraviyole ışınımı ve nem gibi çevresel faktörlere maruz kalmaktadır. Ultraviyole ışınımı, polimer bazlı malzemelerde foto-oksidatif reaksiyonları tetikleyerek polimer zincirlerinde kırılmalara ve yüzey özelliklerinde zayıflamaya neden olabilmektedir. Bunun sonucunda özellikle jelkot tabakasında mekanik özellik kaybı ve renk değişimi gözlemlenebilir.

Diğer yandan ozmotik yaşlanma, su moleküllerinin polimer matris içerisine zamanla difüze olması sonucu oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin genel bir ifadesidir. Bu süreç,

şışme, mikro çatlak oluşumu ve lif-matris ara yüzeyinde zayıflama gibi hasarlara neden olarak kompozitin uzun dönemli dayanımını olumsuz etkileyebilir [7–10].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Numune Üretimi

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit numuneler, Light Resin Transfer Molding (LRTM) yöntemi ile üretilmiştir. LRTM, reçinenin kalıp içine kontrollü şekilde enjekte edilmesini sağlayarak düşük gözeneklilik ve yüksek yüzey kalitesi sunan kompozitler elde edilmesine imkân verir [2,3].

Üretim sürecinde ilk olarak kalıp yüzeyine jelkot tabakası uygulanmıştır. Bu tabaka, hem kompozitin dış yüzeyini oluşturmakta hem de çevresel etkilere karşı koruyucu bir bariyer görevi görmektedir. Jelkot uygulamasını takiben cam elyaf takviyeleri kalıba yerleştirilmiş ve polyester reçine kalıp boşluğuna enjekte edilmiştir. Reçinenin lifleri tamamen ıslatmasının ardından, numuneler belirlenen bekletilerek polimerizasyon [2025].



kürlenme koşullarında tamamlanmıştır (Görsel 2)

Görsel 2. LRTM yöntemi ile CTP numunelerin üretim aşaması, 2025

2.2. Numune Hazırlığı

Kürlenme işleminin tamamlanmasından sonra elde edilen kompozit levhalar, deney prosedürlerine uygun olacak şekilde standart ölçülerde kesilmiştir. Numunelerin geometrik boyutları ve yüzey özellikleri deneysel tutarlılığı sağlamak amacıyla mümkün olduğunca homojen şekilde hazırlanmıştır.

Yaşlandırma uygulanmayan numuneler kontrol grubu olarak ayrılmış, diğer numuneler ise UV ışınımı ve ozmotik yaşlandırma koşullarına belirlenen süreler boyunca maruz bırakılmıştır (Görsel 3) [2025].



Görsel 3. Jelkot kaplı CTP numune, 2025

2.3. UV Yaşlandırma Deneyi

UV yaşlandırma deneyleri, jelkot kaplı CTP kompozitlerin uzun dönemli yüzey performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Numuneler, kontrollü UV ışınımı altında belirlenen süre boyunca tutulmuş, iki günde bir ara değerlendirmeler yapılmıştır (Görsel 4) [2025].

UV ışınımının polimer sistemlerde foto-oksidatif bozunmaya yol açtığı ve yüzey özelliklerinde mekanik zayıflamaya neden olduğu literatürde bildirilmektedir [7–9]. Yaşlandırma sonrası yüzey dayanımı Taber aşınma testi ile ölçülerek, UV etkisi sayısal olarak analiz edilmiştir.



Görsel 4. UV Yaşlandırma Cihazı, 2025

2.4. Ozmotik Yaşlanma Deneyi

Ozmotik yaşlanma testleri, jelkot kaplı CTP numunelerin su ve yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarını incelemek için uygulanmıştır. Numuneler 80 °C su ortamına yerleştirilmiş ve hızlandırılmış nem yaşlandırmasına tabi tutulmuştur. Deney sırasında iki

günde bir numuneler çıkarılarak yüzey dayanımı değişimleri analiz edilmiştir (Görsel 5) [2025]. Su moleküllerinin matris içerisine difüzyonu ve ara yüzey zayıflaması, kompozit performansını etkileyebilmektedir.



Görsel 5. Ozmotik yaşlandırma düzeneği, 2025

2.5. Taber Aşınma Testi

UV ve ozmotik yaşlandırmaya tabi tutulan jelkot kaplı numunelerin yüzey aşınma dirençleri, ASTM D4060 standardına uygun olarak Taber aşınma testi ile belirlenmiştir [1]. Testlerde CS-10 aşındırıcı diskler kullanılmış ve 10.000 devir uygulanmıştır. Deneyler, Devotrans GT-7012-T model cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Görsel 6) [2025].



Görsel 6. Taber aşınma cihazı, 2025

2.6. Aşınma İndeksi Hesaplaması

Taber aşınma testi sonucunda elde edilen kütle kaybı verileri, ASTM D4060 standardında tanımlanan aşınma indeksi (Wear Index) esas alınarak hesaplanmıştır [1]. Aşınma indeksi, numunenin aşındırma öncesi ve sonrası kütle farkının toplam devir sayısına oranlanmasıyla belirlenmektedir:

$$I = ((A - B) \times 1000) / C$$

Burada:

A: Aşındırma öncesi numune ağırlığı (mg)

B: Aşındırma sonrası numune ağırlığı (mg)

C: Toplam aşındırma devri sayısı

olarak tanımlanmaktadır. Hesaplanan aşınma indeksi değerinin düşük olması, numunenin yüzey aşınmasına karşı daha yüksek direnç gösterdiğini ifade etmektedir [1].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde UV ve ozmotik yaşlandırmaya tabi tutulan jelkot kaplamalı cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit numunelerin yüzey dayanımı, Taber aşınma testi sonuçları esas alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler literatürde bildirilen bozunma mekanizmaları ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

3.1. Referans Numunelerin Aşınma Davranışı

Yaşlandırma uygulanmamış referans numuneler, jelkot kaplı CTP kompozitlerin başlangıç yüzey performansını temsil etmektedir. Taber aşınma testi sonuçlarına göre referans numuneler düşük aşınma indeksi değerleri sergilemiştir. Bu durum, jelkot tabakasının yüzey aşınmasına karşı etkin bir bariyer oluşturduğunu göstermektedir.

Jelkot kaplamanın, kompozit sistemlerde dış etkilere karşı ilk koruyucu katman olarak görev yaptığı ve yüzey performansını artırdığı literatürde belirtilmektedir [4,5]. Elde edilen düşük aşınma indeksi değerleri, jelkotun servis öncesi durumda mekanik aşınmaya karşı yeterli direnç sağladığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, jelkot kaplı kompozitlerin yüksek yüzey dayanımı gösterdiğini bildiren çalışmalarla uyumludur [7,8].

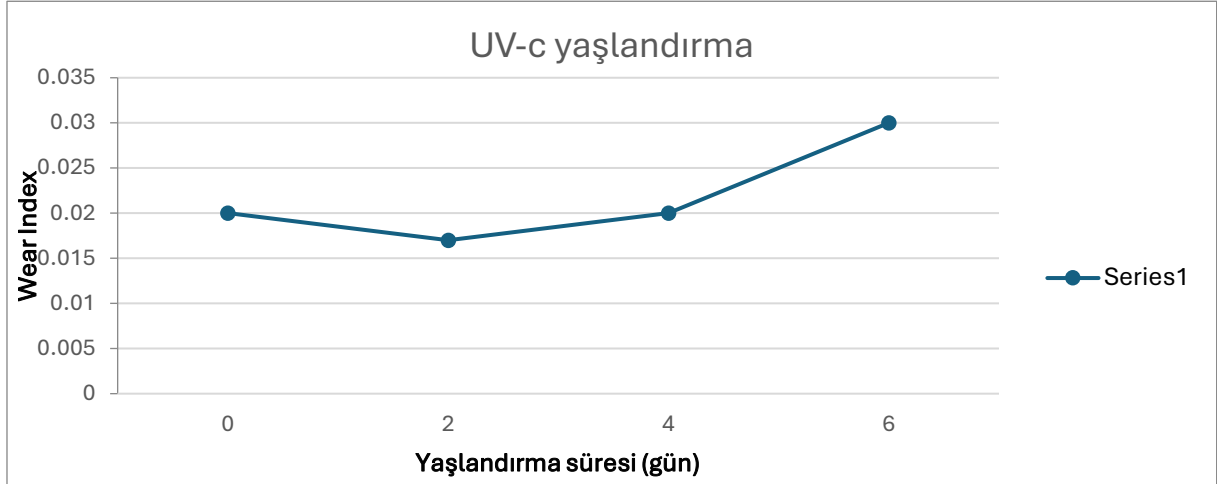
3.2. UV Yaşlanmanın Yüzey Dayanımı Üzerindeki Etkisi

UV yaşlandırma sonrası gerçekleştirilen Taber aşınma testleri, UV ışınımına maruz kalan numunelerde yüzey dayanımının referans grubuna kıyasla azaldığını göstermiştir. Aşınma indeksi değerlerindeki artış, jelkot tabakasının UV maruziyeti sonucu mekanik bütünlüğünü kısmen kaybettiğine işaret etmektedir.

Ultraviyole ışınımının polimer esaslı sistemlerde zincir kırılması, oksidatif reaksiyonlar ve mikro çatlak oluşumu gibi foto-oksidatif bozunma mekanizmalarına neden olduğu bilinmektedir [7–9]. Bu tür mikroyapısal değişimler, yüzey sertliğinin azalmasına ve aşınma direncinin düşmesine yol açabilmektedir.

Yaşlandırma süresinin artmasıyla aşınma indeksi değerlerinde kademeli bir yükselme gözlenmiştir. Bu durum, UV etkisinin zamanla birikimli (kümülatif) bir hasar mekanizması oluşturduğunu göstermektedir. Deney süresince iki günde bir yapılan ölçümler, yüzey performansındaki azalışın zamana bağlı olarak ilerlediğini ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, UV ışınımının termoset polyester esaslı jelkot kaplamaların yüzey özelliklerini olumsuz etkilediğini rapor eden literatür çalışmaları ile paralellik göstermektedir [7,8].



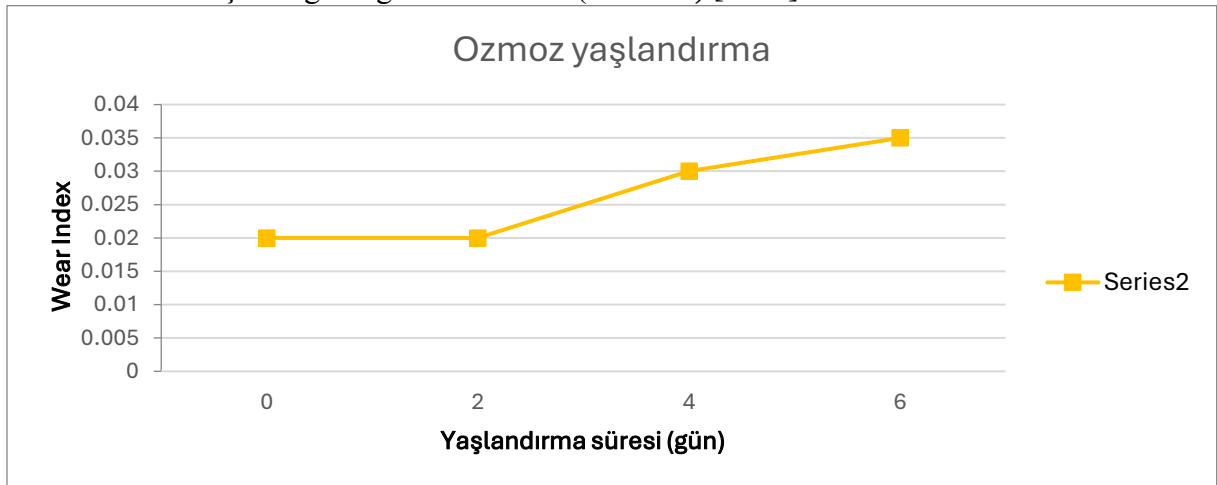
Grafik 1. UV yaşlanma süresinin jelkot kaplı CTP kompozitlerin aşınma indeksi üzerindeki etkisi

3.3. Ozmotik Yaşlanmanın Yüzey Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Ozmotik yaşlanma testleri, yüksek sıcaklıkta su ortamına maruz kalan numunelerin yüzey dayanımında belirgin değişiklikler olduğunu ortaya koymuştur. 80 °C su ortamında gerçekleştirilen hızlandırılmış yaşlandırma, su moleküllerinin jelkot ve matris fazına difüzyonunu artırarak malzemenin yapısında fiziksel ve kimyasal değişimlere yol açmıştır.

Polimer esaslı kompozitlerde su difüzyonu, plastikleşme etkisiyle cam geçiş sıcaklığının düşmesine ve mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olabilmektedir [7,8]. Ayrıca nem, lif-matris ara yüzeyinde aderans kaybına yol açarak yüzey bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir [7]. Özellikle denizel veya nemli ortamlarda kompozit dayanımının zamanla azalacağı literatürde rapor edilmiştir [10].

DeneySEL sonuçlara göre, ozmotik yaşlandırmaya maruz kalan numunelerde aşınma indeksi artmış ve jelkot tabakasındaki plastikleşme ile mikro yapısal zayıflamalar aşınma direncini düşürmüştür. Yaşlandırma süresinin uzaması, yüzey performansındaki bozulmanın giderek belirginleşmesine neden olmuştur. Bu, su difüzyonunun kademeli ve ilerleyici bir hasar mekanizması oluşturduğunu göstermektedir (Grafik 2) [7–10].



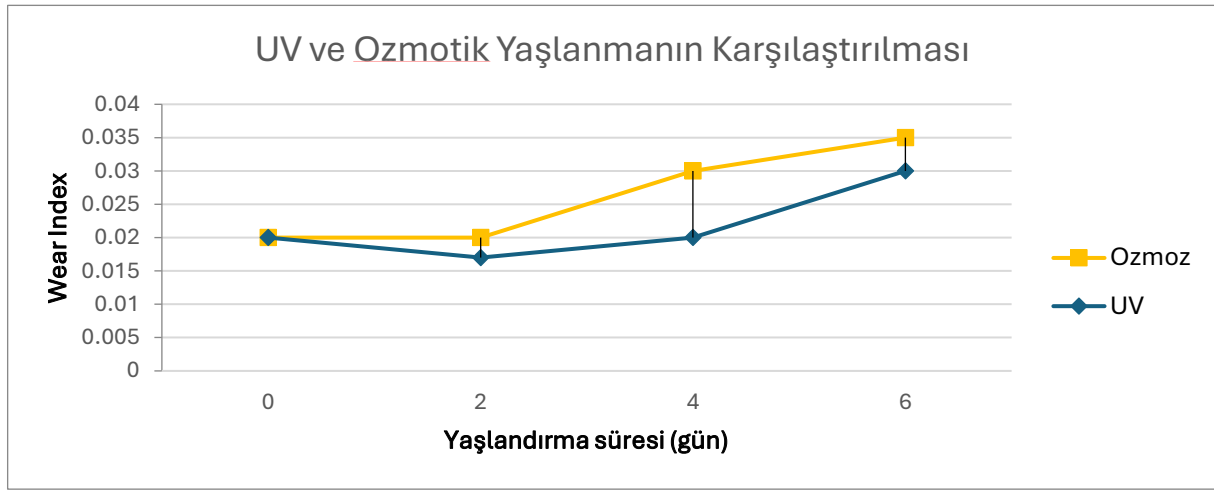
Grafik 2. Ozmotik yaşlanma süresinin jelkot kaplı CTP kompozitlerin aşınma indeksi üzerindeki etkisi

3.4. UV ve Ozmotik Yaşlanmanın Karşılaştırılması

Taber aşınma testi sonuçları UV ve ozmotik yaşlanmanın her ikisinin de jelkot kaplı CTP kompozitlerin yüzey dayanımını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Ancak bozunma mekanizmaları ve etkileri farklıdır.

UV yaşlanma, daha çok yüzey kaynaklı kimyasal bozunmalara neden olur; foto-oksitatif reaksiyonlar, zincir kırılmaları ve mikro çatlaklar yüzey bütünlüğünü bozarak aşınma direncini azaltır [7–9]. Ozmotik yaşlanma ise su difüzyonu ve yüksek sıcaklığın etkisiyle hacimsel değişimler, plastikleşme ve lif-matris ara yüzeyinde zayıflamalar oluşturur [7,8,10].

Deneyisel veriler, bazı koşullarda ozmotik yaşlanmanın UV yaşlanmaya kıyasla daha yüksek aşınma indeksi değerlerine yol açabildiğini göstermektedir. Bu karşılaştırma, jelkot kaplı CTP kompozitlerin servis koşullarında farklı çevresel etkiler altında yüzey



performansının ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Grafik 3).

Grafik 3. UV ve ozmotik yaşlanma koşullarının jelkot kaplı CTP kompozitlerin aşınma indeksi üzerindeki karşılaştırmalı etkisi

3.5. Bulguların Literatür ile Karşılaştırılması

Elde edilen bulgular, jelkot kaplamalı CTP kompozitlerin çevresel koşullara karşı duyarlılığını ve yüzey performansındaki değişim mekanizmalarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. UV ışınımı, jelkot tabakasında foto-oksitatif bozunma ve mikro çatlak oluşumuna yol açarak yüzey sertliğini ve aşınma direncini azaltmaktadır [7–9]. Buna karşılık, ozmotik yaşlanma süreci su moleküllerinin matris içerisine difüzyonu ve sıcaklığın etkisiyle plastikleşme, şişme ve lif-matris ara yüzeyinde zayıflama gibi hacimsel etkiler oluşturmaktadır [7,8,10].

Taber aşınma testi verilerinde gözlenen artışlar, her iki yaşlanma türünün de jelkot tabakasının koruyucu işlevini zamanla azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte, bozunma mekanizmaları farklıdır: UV bozunması esas olarak yüzey tabakasında kimyasal değişimlerle ilerlerken, ozmotik yaşlanma hem yüzeyde hem de kompozitin iç yapısında mekanik ve yapısal zayıflamalara yol açmaktadır [10–12].

Bu sonuçlar, literatürde bildirilen bulgularla büyük ölçüde uyumludur. Önceki çalışmalar, UV ve nem etkilerinin kompozit yüzeylerinde aşınma direncini azalttığını ve jelkot tabakasının uzun süreli performansının çevresel koşullara bağlı olarak değişebileceğini rapor etmektedir [7–12]. Dolayısıyla, jelkot kaplamalı CTP kompozitlerin servis ömrü ve yüzey dayanımı, maruz kalacakları çevresel koşulların türüne ve süresine bağlı olarak öngörülmelidir.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, jelkot kaplı cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozitlerin UV ve ozmotik yaşlanma koşulları altındaki yüzey dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Yüzey dayanımındaki değişimler, ASTM D4060 standardına uygun olarak gerçekleştirilen Taber aşınma testi verileri temel alınarak değerlendirilmiştir [1].

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Referans numuneler: Yaşlandırma uygulanmamış numuneler, düşük aşınma indeksi değerleri sergilemiş ve jelkot tabakasının CTP kompozit yüzeylerde etkili bir koruyucu bariyer oluşturduğunu göstermiştir [4,5].
- UV yaşlanma etkisi: UV ışınımına maruz bırakılan numunelerde yüzey dayanımında belirgin azalma gözlenmiştir. UV maruziyeti arttıkça aşınma indeksi değerlerinde artış meydana gelmiş ve jelkot tabakasında yüzey kaynaklı kimyasal bozunmanın etkili olduğu tespit edilmiştir [7–9].
- Ozmotik yaşlanma etkisi: 80 °C sıcaklıkta su ortamında gerçekleştirilen ozmotik yaşlanma deneyleri sonucunda, numunelerin yüzey dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Su difüzyonu ve sıcaklık etkisi jelkot tabakasında plastikleşme ve hacimsel değişimlere yol açmış, bu durum aşınma direncini olumsuz etkilemiştir [7,8,10].
- UV ve ozmotik yaşlanmanın karşılaştırılması: Her iki yaşlandırma türü de jelkot kaplı CTP kompozitlerin yüzey aşınma direncini azaltmıştır. Ancak bozunma mekanizmaları farklıdır; UV bozunması daha çok yüzey kaynaklı kimyasal değişimlerle, ozmotik yaşlanma ise hacimsel ve fiziksel değişimlerle yüzey performansını etkilemiştir [7–10].
- Servis performansı: 10.000 devir boyunca yapılan Taber aşınma testleri, çevresel yaşlanma koşullarının jelkot kaplı CTP kompozitlerin yüzey performansını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Bu bulgular, malzemenin servis ömrü ve uygulama güvenliği açısından dikkate alınması gereken önemli bilgiler sunmaktadır [1,7–10].

Sonuç olarak, jelkot kaplamalı CTP kompozitler, çevresel koşullar altında zamanla yüzey dayanımlarında kayıplar yaşamaktadır. UV ve ozmotik etkilerin farklı mekanizmalarla yüzey performansını bozması, bu tür malzemelerin uzun süreli kullanımında maruz kalacakları çevresel koşulların ayrı ayrı değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] ASTM D4060–10, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010.

[2] Mallick, P. K., Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, CRC Press, Boca Raton, 2007.

- [3] Strong, A. B., *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers (SME), 2008.
- [4] Jones, F. R., *Handbook of Polymer-Fibre Composites*, Longman Scientific & Technical, Harlow, 1994.
- [5] Akay, M., *Mechanical Behaviour of Composite Materials*, Springer, London, 2018.
- [6] Carlsson, L. A., Adams, D. F. ve Pipes, R. B., *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*, CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [7] Ray, B. C., Effects of Environmental Exposure on Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23, 7, 671–684, 2004.
- [8] Chin, J. W., Nguyen, T. ve Aouadi, K., Effects of Environmental Exposure on Fiber-Reinforced Polymer Composites, *Journal of Composite Materials*, 33, 2, 100–120, 1999.
- [9] Nguyen, T., Byrd, E. ve Bentley, J., Effect of UV Radiation on the Mechanical Properties of Polyester-Based Composites, *Polymer Degradation and Stability*, 77, 1–16, 2002.
- [10] Davies, P., Durability of Composites in a Marine Environment, *Composites Science and Technology*, 65, 1427–1439, 2005.
- [11] Funke, W., Weathering of Coatings, *Progress in Organic Coatings*, 31, 5–9, 1997.
- [12] Karbhari, V. M., Chin, J. W., Hunston, D. ve Benmokrane, B., Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure, *Journal of Composites for Construction*, 7, 3, 238–247, 2003.
- [13] Mouritz, A. P. ve Gibson, A. G., *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, Dordrecht, 2006.
- [14] Pickering, K. L., Efendy, M. G. A. ve Le, T. M., A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites and Their Mechanical Performance, *Composites Part A*, 83, 98–112, 2016.

MOBİLYA SEKTÖRÜNDE KAPASİTE PLANLAMA VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ANALİZİ: ANKARA ÖRNEĞİ

Dr. Ramazan BÜLBÜL

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, Ankara,
Turkey

ramazanbulbul@gazi.edu.tr - **ORCID ID:** 0000-0003-4760-9166

Mustafa ALBAYRAK

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering,
Ankara, Turkey

Albayrak.mustfa@gmail.com - **ORCID ID:** 0009-0002-0761-4956

ÖZET

Mobilya sektörü; emek yoğunluğu, yüksek ürün çeşitliliği ve siparişe dayalı üretim dinamikleri nedeniyle kapasite planlamasının en karmaşık olduğu endüstri kollarından biridir. Türkiye ekonomisinde üretim ve istihdam açısından stratejik bir öneme sahip olan bu sektörde, kaynakların etkin kullanımı ve verimlilik artışı, doğru kurgulanmış kapasite planlama stratejilerine bağlıdır. Bu çalışmanın amacı; Türkiye’de faaliyet gösteren mobilya üretim işletmelerinin mevcut kapasite planlama yöntemlerini incelemek, süreçte karşılaşılan temel darboğazları tespit etmek ve sektörün dijital dönüşüm ihtiyaçlarını analiz etmektir. Araştırmada nicel araştırma yöntemi benimsenmiş ve Türkiye genelinde, ağırlıklı olarak Ankara bölgesinde faaliyet gösteren 38 mobilya üretim işletmesine yönelik yapılandırılmış bir anket çalışması uygulanmıştır. Elde edilen veriler; TOBB kapasite kriterleri ve literatürdeki modern planlama yaklaşımları çerçevesinde değerlendirilmiştir. Araştırma bulgularına göre; işletmelerin %68,4’ünün kapasite planlamasında halen manuel hesaplamaları (Excel vb.) birincil araç olarak kullandığı, %44,7’sinin ise ERP/MRP sistemlerine geçiş sürecinde olduğu görülmüştür. Sektörde kapasite kullanımını sınırlandıran temel faktörler; nitelikli personel eksikliği, talep tahminlerindeki sapmalar ve makine parkurundaki plansız duruşlar olarak belirlenmiştir. Ayrıca işletmelerin finansal kısıtlar ve teknik bilgi yetersizliği nedeniyle veri odaklı karar destek sistemlerine geçişte zorlandıkları, buna karşın simülasyon ve optimizasyon araçlarına yönelik yüksek bir talep (%52) duydukları saptanmıştır. Sonuç olarak, Türkiye mobilya sektöründe kapasite planlamasının büyük ölçüde geleneksel yöntemlerle sürdürüldüğü ve bu durumun esnek üretim kabiliyetini kısıtladığı tespit edilmiştir. Çalışma, sürdürülebilir verimlilik için "tahminleme-planlama-üretim" döngüsünün dijitalleşmesi gerektiğini vurgulamakta; üniversite-sanayi iş birliği ve nitelikli iş gücü yetiştirilmesine yönelik stratejik öneriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mobilya Sektörü, Kapasite Planlama, Dijital Dönüşüm, ERP, Üretim Verimliliği.

CAPACITY PLANNING AND DIGITAL TRANSFORMATION ANALYSIS IN THE FURNITURE INDUSTRY: THE ANKARA EXAMPLE

ABSTRACT

The furniture industry is one of the most complex sectors in terms of capacity planning due to its labor-intensive nature, high product variety, and order-based production dynamics. This sector, which holds strategic importance in the Turkish economy in terms of production and employment, relies on well-designed capacity planning strategies for efficient resource utilization and increased productivity. The aim of this study is to examine the current capacity planning methods of furniture manufacturing companies operating in Turkey, identify the main bottlenecks encountered in the process, and analyze the digital transformation needs of the sector. A quantitative research method was adopted, and a structured survey was conducted among 38 furniture manufacturing companies operating throughout Turkey, primarily in the Ankara region. The data obtained were evaluated within the framework of TOBB capacity criteria and modern planning approaches in the literature. According to the research findings, 68.4% of the companies still use manual calculations (Excel, etc.) as their primary tool in capacity planning, while 44.7% are in the process of transitioning to ERP/MRP systems. The main factors limiting capacity utilization in the sector were identified as a shortage of qualified personnel, deviations in demand forecasts, and unplanned downtime in the machinery park. Furthermore, it was found that businesses struggle to transition to data-driven decision support systems due to financial constraints and insufficient technical knowledge, while showing a high demand (52%) for simulation and optimization tools. Consequently, it was determined that capacity planning in the Turkish furniture sector is largely carried out using traditional methods, and this restricts flexible production capabilities. The study emphasizes the need for the digitalization of the "forecasting-planning-production" cycle for sustainable productivity; and offers strategic recommendations for university-industry collaboration and the training of a qualified workforce.

Keywords: Furniture Industry, Capacity Planning, Digital Transformation, ERP, Production Efficiency.

1.GİRİŞ

Mobilya sektörü; ürün çeşitliliğinin fazla olması, müşteri taleplerindeki değişkenlik, sipariş özel üretimin yaygınlığı ve mevsimsel dalgalanmalar gibi kendine has dinamiklere sahiptir. Bu durum, kapasite planlamasını daha karmaşık ve kritik bir hale getirmektedir. İşletmelerin bu değişken yapıya uyum sağlayabilmeleri ve rekabet gücü kazanabilmeleri için üretim

kapasitelerini doğru şekilde belirlemeleri ve mevcut kapasitelerini verimli kullanmaları büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, mobilya sektöründe faaliyet gösteren işletmeler için kapasite konusunun önemi ele alınarak; kapasitenin temel özellikleri ve kapasite türleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kapasite planlaması, kapasite ayarlamaları, karar sürecinde etkili olan parametreler ve kullanılan teknikler değerlendirilmiştir. Özellikle mobilya sektörüne özgü yapının kapasite performansı üzerindeki problemlere odaklanılmıştır. Literatürde yer alan farklı ölçüm teknikleri incelenecek; ayrıca sektör temsilcilerine yönelik yürütülen anket çalışmasının sonuçları değerlendirilerek sektörün kapasiteye ilişkin mevcut durumu ve sorunları ortaya konulmuştur.

Çalışmanın kapsamını Ankara’da faaliyet gösteren çeşitli büyüklüklerdeki mobilya işletmeleri oluşturmaktadır. Araştırma sorularını yanıtlamak amacıyla anket yöntemine dayalı nicel bir veri toplama ve analiz süreci yürütülmüştür. Çalışmanın yalnızca Ankara ile sınırlı tutulması, firmaların iç verilerine erişimin katılımcıların beyanlarıyla kısıtlı kalması ve sektördeki hızlı teknolojik dönüşümün getirdiği zaman duyarlılığı, araştırmanın temel sınırlılıkları olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Ankara’da mobilya sektöründe faaliyet gösteren üretim işletmelerinin kapasite planlama süreçlerinde karşılaştıkları problemleri belirlemek, nedenlerini analiz etmek ve sektörel gelişime katkı sağlayacak çözüm önerileri sunmaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

İşletme biliminde kapasite, en genel tanımıyla bir sistemin belirli bir zaman diliminde mal veya hizmet üretebilme yeteneği ve elde edebileceği en yüksek çıktı miktarı olarak ifade edilmektedir. Günümüz rekabet koşullarında bu kavram salt fiziki üretimden ziyade, mevcut girdilerle birim maliyetlerin minimum kılındığı "ekonomik kapasite" odağında değerlendirilmektedir (Torunoğlu F., 2006). Bu bağlamda kapasite planlaması; şirketlerin gelecekteki pazar talebini karşılamak için ihtiyaç duydukları kaynak miktarını belirleyerek, kaynakların mevcudiyeti ile müşteri talepleri arasında optimum dengeyi kurma sürecidir (Yagüe, 2025; Bulut, 2004; Uludağ, 2025). Etkili bir planlama stratejisi, işletmelerin atıl veya eksik kapasite sorunlarıyla karşılaşmasını engelleyerek kaynak israfını önler, operasyonel verimliliği maksimize eder ve genel karlılığa doğrudan katkı sağlar (Bulut E., 2004). İşletmelerin büyüme hedefleri doğrultusunda kısa, orta ve uzun vadeli olarak yürütülen kapasite planlama kararları; pazar talebindeki dalgalanmalar, hammadde tedariki, teknolojik altyapı ve finansal kısıtlar gibi çok çeşitli faktörlerin baskısı altındadır (Torunoğlu F., 2006; Toker B., 1985). Talebin değişken, ürün yapısının ise karmaşık olduğu üretim ortamlarında geleneksel deneme-yanılma yöntemleri yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle modern üretim yönetiminde, üretim kaynakları planlaması (MRP II), kapasite ihtiyaç planlaması (CRP) ve simülasyon gibi ileri analitik tekniklerin kullanımı ön plana çıkmaktadır (Uludağ S., 2025). Sonuç olarak kapasite planlaması, aşırı maliyetlere katlanmadan pazar talebine yanıt verebilmeyi sağlayan ve işletmelerin rekabet avantajı elde etmesinde stratejik rol oynayan kritik bir karar mekanizmasıdır (Toker B., 1985).

Mobilya sektörü, küresel ekonominin desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır ve 2026 yılına kadar yıllık %8,2'lik istikrarlı bir büyüme oranı yaşaması ve sonunda 940 milyar dolarlık bir değere ulaşması öngörülmektedir. Türkiye, 2022 yılı itibarıyla dünya mobilya üretiminde ve ihracatında 11. sırada yer almaktadır ve dünya mobilya ihracatının %1,7'sini gerçekleştirmektedir. Sektör, geçmişte atölye benzeri küçük işletmelerin hakimiyetindeyken, teknolojik gelişmeler ve nitelikli eleman sayısındaki artışla birlikte fabrikasyon tarzı işletmelere doğru bir evrim geçirmiştir. Türkiye'deki mobilya endüstrisi, orman ürünlerinin bol olduğu veya pazar talebinin yüksek olduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Üretim açısından kilit bölgeler İstanbul, Ankara, Bursa (İnegöl), Kayseri, İzmir ve Adana'dır. Türkiye mobilya sektörü hem yurt içinde hem de yurt dışında büyüme kaydetmektedir ve dış ticaretteki başarısı ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda önemli bir istihdam kaynağıdır (Özkan, 2006).

Avrupa Birliği ülkeleri dünya mobilya ihracatında büyük ölçüde söz sahibidir ve birçok AB ülkesinde mobilya imalatı temel bir endüstridir (ASO, 2017).

Mobilya sektörü Türkiye'nin en eski sektörlerinden biridir ve önceleri düşük teknolojiye ve emek yoğun üretim yapısına sahipken günümüzde daha fazla bilgi ve sermaye yoğun bir sektör olma yolunda ilerlemektedir. Sektör, üretim ve istihdam ile ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır ve ihracatıyla Türkiye, dünya mobilya ihracatında önemli ihracatçı ülkeler arasında yer almaktadır. Ancak, Türkiye'nin mobilya sektöründeki ihracat rakamları mevcut üretim potansiyelinin altında kalmaktadır. Hammadde tedarikinde yaşanan sorunlar da mobilya sektörünü olumsuz etkilemektedir. Yeterli miktarda ve kalitede hammaddenin uygun fiyatla tedarigi sağlanmalıdır (Sütçü O.K., 2005). Ağaç işleri makinelerinde miktar ve kalite olarak artışlar olmasına rağmen, teknolojiye hızlı gelişme bu sanayi kolunda hızlı adaptasyonu sağlamada engel oluşturmuştur ve mobilya endüstrisi hassas işleme kabiliyeti olan bilgisayar kontrollü makine kullanımının yaygınlaşmasına ihtiyaç duymaktadır (İnal 2006). Emek yoğun bir sektör olması nedeniyle sektördeki SGK ve diğer yüklerin hafifletilmesi sektöre rekabet gücü kazandıracaktır. Mobilya sektörünün kapasite kullanım oranı da rekabet gücü yüksek olan ülkelerin oranlarından daha düşüktür ve bu durum önemli bir zorluk teşkil etmektedir (Demirci, 2005).

Genel üretim işletmelerinde kapasite planlama, yeterli üretim veya iş kapasitesi ile doğru zamanda doğru miktarı sağlayabilmeyi amaçlar. Ancak, üretim işletmelerini değişikliklerle karşı karşıya getiren tahmin hataları, ürün ağaçlarının yenilenmesi, fire oranının artması, tedarikçilerin geç kalması gibi etmenler kapasite planlamasında sorunlara yol açabilmektedir. Bu durum, çok aşırı yeniden çizelgeleme ve dinamik teslim süreleri gibi problemleri beraberinde getirebilir (Altınok H., 2005).

Mobilya sektöründe yatak üretimi yapan bir işletmede iş gören verimliliğinin düşmesine yol açan iş zaman kayıplarının belirlenmesi ve simülasyon yöntemi ile kapasite artırımı üzerine yapılan bir çalışmada, düşük verimlilik ve üretim planlama zorluğu gibi sorunlara dikkat çekilmiştir (Ekşi A., 2001). Türkiye mobilya sektöründe genel olarak düşük kapasite kullanım oranları önemli bir problem olarak tespit edilmiştir ve bu durumun nedenleri arasında hammadde yetersizliği, teknik bilgi eksikliği, sermaye yetersizliği ve üretim sırasında karşılaşılan sıkıntılar sayılmaktadır. Panel mobilya üretiminde üretim planlama eksikliklerinden kaynaklanan sorunların tespiti ve çözüm önerileri üzerine anket çalışmaları yapılmıştır (Sütçü

A., 2005). Ayrıca, mobilya sektörünün tedarik zincirinde tedarikçilerin kapasite problemleri de işletmeler tarafından dile getirilmektedir (Güler M., 2019).

3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, Türkiye mobilya sektöründe faaliyet gösteren üretim işletmelerinin kapasite planlama süreçlerindeki durumunu, karşılaştıkları zorlukları ve teknolojik ihtiyaçlarını belirlemek amacıyla nicel araştırma yöntemlerinden anket tekniği kullanılmıştır. Kesitsel araştırma tasarımının benimsendiği çalışmada, veriler tek bir zaman diliminde toplanarak sektörel eğilimlerin betimsel ve çıkarımsal analizinin yapılması hedeflenmiştir.

Veri toplama aracı olarak, araştırmacı tarafından sektörel dinamikler (siparişe dayalı üretim, ürün çeşitliliği, mevsimsellik vb.) göz önüne alınarak özgün bir anket formu geliştirilmiştir. Toplam 19 sorudan oluşan çevrimiçi anket (Google Forms), işletmelerin kurumsal özelliklerini, kapasite planlama pratiklerini, kullandıkları veri kaynaklarını ve gelişim alanlarını ölçmeyi amaçlamıştır. Soruların anlaşılabilirliğini test etmek için öncelikle bir pilot uygulama yapılmış ve elde edilen geri bildirimler doğrultusunda gerekli sadeleştirmeler yapılarak asıl veri toplama aşamasına geçilmiştir.

Tamamen gönüllülük esasına dayalı olarak sosyal medya ve sektörel iletişim kanalları üzerinden dağıtılan ankete toplam 50 yanıt gelmiştir. Ancak araştırmanın kapsamı ve geçerliliği gereği, yalnızca çalışmanın temel odak noktasıyla doğrudan ilgili olan 38 farklı mobilya işletmesinin verisi dâhil edilmiştir. Bu örneklem büyüklüğü, hedeflenen sektördeki kalıpları ve kapasite verimsizliklerinin nedenlerini istatistiksel olarak ortaya koymak için temel kabul edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Katılımcı işletmelerin demografik profili araştırmaya katılan 38 mobilya ve ahşap sanayi işletmesinin büyük bir bölümü sektörel kümelenmenin yoğun olduğu Ankara'da faaliyet göstermektedir. İşletmelerin çalışan sayıları incelendiğinde, KOBİ ölçeğindeki firmaların ağırlıkta olduğu, ancak büyük bir kısmının 20 yıldan uzun süredir sektörde yer alan, finansal açıdan sağlam (yıllık 10 milyon TL üzeri ciroya sahip) ve olgunlaşmış yapılar olduğu

görülmektedir. Bu profil, elde edilen bulguların sektörde yerleşik, ancak geleneksel yöntemlere bağlı kalma eğilimi taşıyabilen KOBİ'lerin gerçekliğini yansıttığını göstermektedir.

Kapasite planlama süreçleri ve kullanılan yöntemler işletmelerde kapasite planlama süreçleri ağırlıklı olarak Üretim Müdürleri, Planlama Departmanları ve Endüstri Mühendisleri gibi teknik kadrolar tarafından yürütülmektedir. Sektörün yüksek ürün çeşitliliği ve siparişe dayalı yapısı nedeniyle planlamalar genellikle "proje bazlı", "aylık" veya "ihtiyaca göre" yapılmaktadır. Kullanılan yöntemler incelendiğinde çok çarpıcı bir çelişki ortaya çıkmaktadır: Katılımcıların finansal olgunluğuna rağmen %68,4'ü kapasite planlamasında hala "manuel hesaplamalara (Excel, defter vb.)" bağımlıdır. ERP/MRP sistemleri (%44,7) ve veri analiz araçlarının kullanımı daha düşük seviyelerdedir. Satış tahminleri ve müşteri siparişleri en çok kullanılan veri kaynakları olsa da bu verilerin manuel süreçlerle entegre edilmesi planlama hatalarına zemin hazırlamaktadır.

Karşılaşılan temel problemler ve performansa etkisi işletmelerin kapasite planlamasında karşılaştıkları en temel darboğazlar sırasıyla; "personel eksikliği/nitelik sorunları", "makine arızaları/bakım problemleri", "mevsimsel dalgalanmalar" ve "talep tahminindeki hatalar" olarak belirlenmiştir. Bu sorunlar birbirini tetikleyen bir yapıdadır; örneğin, talep tahmin hataları doğrudan âtil kapasiteye veya karşılanamayan siparişlere yol açmaktadır. Katılımcıların büyük bir kısmı, bu planlama sorunlarının işletme performansını "orta" veya "çok" düzeyde etkilediğini belirtmiştir. İşletmeler kronikleşmiş verimsizliklere alışıp bunlarla başa çıkma mekanizmaları geliştirmiş olsalar da, yaşanan teknik ve teknolojik zorluklar uzun vadeli rekabet gücünü aşındırmaktadır. Dış etkenler (ekonomik dalgalanmalar, tedarik zinciri aksaklıkları) firmalar tarafından genellikle kontrol edilemeyen "veriler" olarak kabul edilse de stratejik planlamayı doğrudan sekteye uğratmaktadır.

Dijital dönüşüm ihtiyacı ve gelişim alanları elde edilen bulgular, mobilya sektöründe ciddi bir dijital dönüşüm farkındalığı olduğunu kanıtlamaktadır. İşletmeler, kapasite planlama süreçlerinin genel başarıya olan "büyük katkısının" farkındadır. Bu doğrultuda en çok iyileştirme yapılmak istenen alanların başında "Eğitim ve personel gelişimi" ile "Yazılım ve teknoloji kullanımı" gelmektedir. Manuel süreçlerin yetersizliğini kabul eden işletmeler, rekabetçi kalabilmek adına gelecekte en çok "Veriye dayalı karar destek sistemleri", "Simülasyon ve optimizasyon araçları" ve "Yeni nesil ERP/MRP yazılımları" kullanmayı hedeflemektedir. Bu durum, sektörde ileri teknoloji yatırımlarına ve bu teknolojileri yönetecek insan kaynağına yönelik acil bir ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma mobilya sektöründeki üretim işletmelerinin kapasite planlaması süreçlerine ilişkin önemli bulguları ortaya koymuştur. Çalışma, sektörün demografik ve kurumsal yapısına, mevcut kapasite planlama uygulamalarına, karşılaşılan zorluklara ve gelecekteki gelişim alanlarına yönelik ihtiyaçlara dair kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır.

İşletmelerin büyük bir kısmı kapasite planlamasında hala "manuel hesaplamalar" ve Excel gibi temel araçlara güvenmektedir. Ancak, aynı zamanda "veri odaklı karar destek sistemleri", "simülasyon ve optimizasyon araçları" ve "yeni ERP/MRP yazılımları" gibi daha gelişmiş yöntem ve araçlara yönelik güçlü bir arzu bulunmaktadır. Bu durum, sektörde dijital dönüşüme yönelik bir isteklilik olduğunu, ancak mevcut teknolojik altyapı ve yetenekler arasında bir boşluk bulunduğunu göstermektedir.

Mobilya sektörü işletmeleri, kapasite planlamasında "personel eksikliği veya nitelik sorunları", "talep tahminindeki hatalar", "makine arızaları" ve "tedarik zinciri aksaklıkları" gibi çok çeşitli ve birbiriyle ilişkili sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu sorunlar, işletme performansını genellikle "orta düzeyde" etkilemekle birlikte, kronikleşmiş etkileri uzun vadede önemli verimlilik kayıplarına yol açabilmektedir. Özellikle, dış etkenlerin (ekonomik koşullar, mevsimsel dalgalanmalar) etkisi, şirketlerin bu zorlukları içselleştirmesi nedeniyle bazen hafife alınabilmektedir.

İşletmeler, kapasite planlama süreçlerinde en çok "eğitim ve personel gelişimi" ile "yazılım ve teknoloji kullanımı" konularında iyileşme ihtiyacı duymaktadır. Bu durum, insan sermayesinin geliştirilmesi ve modern teknolojik araçların benimsenmesinin, sektördeki kapasite planlama sorunlarının üstesinden gelmek için kritik öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Genel olarak, katılımcı işletmelerin büyük çoğunluğu (%86,8'i) kapasite planlamasının işletme başarısına "büyük" veya "orta düzeyde" katkı sağladığını belirtmiştir. Bu yüksek algı, sektörün kapasite yönetiminin stratejik önemini kavradığını ve bu alandaki yatırımlara açık olduğunu göstermektedir.

Sektördeki KOBİ'lerin yoğunluğunun göz önüne alınması, kapasite planlama yazılımları ve eğitimleri için maliyet etkin ve ölçeklenebilir çözümler geliştirilmelidir. KOSGEB gibi kurumlar aracılığıyla, küçük seçenekler bütçelerine uygun, kullanımı kolay ERP/MRP sistemlerine erişimleri kolaylaştırılabilir ve bu sistemlerin devredilmesi için danışmanlık hizmetleri sunulmalıdır.

"Personel eksikliği veya nitelik sorunları"nın en önemli problem olması nedeniyle Ağaç İşleri

Endüstri Mühendisliği bölümleri, meslek liseleri ve üniversiteler arasında iş birliği artırılmalıdır. Sektörün yönüne yönelik güncel kapasite planlama teknikleri, veri analizi ve yazılım kullanımı eğitimleri düzenlenmeli, mevcut devre dışı kalma durumunun sürekli geliştirilmesi desteklenmelidir.

İşletmelerin "talep tahminlerindeki hatalar" ve "veri toplama ve analizlerdeki ayrıntılardaki eksiklikler"i gidermek için, veri toplama altyapılarını desteklemeleri ve analitik destekleri artırmaları gerekmektedir. Bu bağlamda, "veri odaklı karar destek sistemleri"nin benimsenmesi teşvik edilir, bu sistemlerin teslimatı öngörüselle analizlerle daha doğru talep tahminleri yapılması hedeflenmelidir.

Mobilya sektörünün yüksek ürün çeşitliliği ve kişiselleştirme talebinin göz önüne alınması, "simülasyon ve parçalama araçları"nın kullanımı, farklı üretim senaryolarını test etmek ve darboğazları belirleyerek kapasiteyi en verimli şekilde kullanmak için büyük potansiyel sunmaktadır. Bu tür araçların tanıtımı ve kullanımı için pilot projeler ve başarı hikayeleri oluşturulabilir.

6. KAYNAKÇA

1. Altınok, H. (2005). Üretim işletmelerinde kapasite planlama ve çizelgeleme problemleri üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
2. Ankara Sanayi Odası (ASO). (2017). Mobilya Sektörü Raporu. Ankara: Ankara Sanayi Odası Yayınları.
3. Bulut, E. (2004). Mobilya sektöründe talep tahmini ve kapasite planlaması ilişkisi: Bir model önerisi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
4. Demirci, S. (2005). Türkiye mobilya sektörünün yapısal analizi ve rekabet gücü. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
5. Ekşi, A. (2001). Mobilya sektöründe üretim sistemlerinin simülasyon yöntemi ile analizi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
6. Güler, M. (2019). Mobilya sektöründe tedarik zinciri yönetimi ve kapasite sorunları üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa.
7. İnal, S. (2006). Mobilya endüstrisinde üretim teknolojileri ve makine kullanımının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
8. Özkan, İ. (2006). Türkiye mobilya sektörünün yapısal analizi ve uluslararası rekabet gücü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
9. Sütçü, A. (2005). Panel mobilya üretiminde üretim planlama sorunları ve çözüm önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
10. Sütçü, O. K. (2005). Türkiye mobilya sektöründe hammadde tedarik sorunları ve çözüm önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
11. Toker, B. (1985). Üretim yönetimi ve kapasite planlaması. İstanbul: İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Yayınları.

12. Torunoğlu, F., (2006). Kapasite Planlaması ve Mobilya Üretim Sistemlerinde Kapasite Üzerinde Etkili Faktörlerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.
13. Yagüe, A. (2025). Capacity planning and resource optimization in manufacturing systems. Journal of Production Management, 18(2), 115-128.
14. Uludağ, S. (2025). *Kapasite planlaması ve yönetimi*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Erişim adresi:
<https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/serhat.uludag/122286/Kapasite%20Planlamas%C4%B1%20.pdf> (Erişim Tarihi: 05.03.2026).

ATIK TETRPAK AMBALAJLAR VE DOĞAL AHŞAP KAPLAMALARIN KOMBINASYONU İLE TUTKALSIZ KOMPOZİT PANEL GELİŞTİRİLMESİ

Dr. Ramazan BÜLBÜL

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering,
Ankara, Turkey

ramazanbulbul@gazi.edu.tr - **ORCID ID:** 0000-0003-4760-9166

Musa Bedirhan SÜRÜCÜ

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering,
Ankara, Turkey

surucubedirhan06@gmail.com - **ORCID ID:** 0009-0009-2711-7659

Murat CAN

Mahmudiye neighbourhood Karaagac Street 27. Mobilya Street No:41,(TigerWood) Bursa,
Turkey

info@tigerwood.com.tr - **ORCID ID:** 0009-0006-7315-5179

ÖZET

Günümüzde hızla artan dünya nüfusu, katı atık miktarında ciddi bir artışa neden olmakta ve sürdürülebilir bir gelecek için geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Kağıt, polietilen ve alüminyumdan oluşan çok katmanlı aseptik ambalajlar (TetraPak), geri kazanımı kritik olan atık grupları arasında yer almaktadır. Araştırmalara göre bu yöntemlerden birisi de panel üretimidir. Bu çalışmada, tek kullanımlık TetraPak atıkları ile estetik ve yapısal özelliklere sahip doğal ahşap kaplamaların birleştirilmesiyle; piyasada yaygın olarak kullanılan OSB, MDF ve yonga levha gibi ürünlere alternatif, çevre dostu bir kompozit panel geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında yerli meşe, yerli ceviz ve sarıçam olmak üzere üç farklı ağaç türünden elde edilen kaplamalar kullanılmış ve paneller presleme yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozit panellerin fiziksel performanslarını belirlemek amacıyla; rutubet miktarı, tam kuru yoğunluk, hava kurusu yoğunluk ve su alma/şişme testleri gerçekleştirilmiştir. Şişme testi sonuçlarına göre ortalama değerler; meşe kaplamalı kompozit panelde (MKKP) %6.76, ceviz kaplamalı panelde (CKKP) %7.40 ve sarıçam kaplamalı panelde (SKKP) %6.92 olarak kaydedilmiştir. Fiziksel analizlerde ortalama rutubet değerleri sırasıyla %1.44 (MKKP), %1.70 (CKKP) ve %1.99 (SKKP) olarak ölçülürken; tam kuru yoğunluk değerleri 0.873-0.896 g/cm³; hava kurusu yoğunluk değerleri ise 0.903-0.930 g/cm³ aralığında saptanmıştır. Çalışmanın en önemli çıktısı, TetraPak yapısında bulunan polietilenin presleme esnasında ahşap malzeme ile kuvvetli bir bağ oluşturmasıdır. Bu termoplastik etkileşim, ilave bir tutkal kullanımına gerek kalmadan tutunma sağlayarak üretim maliyetlerini düşürmüş ve malzemenin sürdürülebilirlik değerini artırmıştır. Elde edilen bulgular, atık TetraPak ambalajların doğal ahşap kaplamalarla birlikte endüstriyel panel üretiminde çevre dostu bir alternatif olarak kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: TetraPak, Geri Dönüşüm, Ahşap-Plastik Kompozit, Tutkalsız Bağlanma, Sürdürülebilirlik

Development of Adhesive-Free Composite Panels Through the Combination of Waste TetraPak Packaging and Natural Wood Veneers

ABSTRACT

Today, the rapidly increasing global population leads to a significant rise in the amount of solid waste, obligating the development of recycling methods for a sustainable future. Multi-layered aseptic packaging (TetraPak), consisting of paper, polyethylene, and aluminum, is among the waste groups whose recovery is critical. According to research, one of these recovery methods is panel production. In this study, by combining single-use TetraPak waste with natural wood veneers possessing aesthetic and structural properties, it was aimed to develop an eco-friendly composite panel as an alternative to widely used commercial products such as OSB, MDF, and particleboard. Within the scope of the study, veneers obtained from three different tree species—native oak, native walnut, and Scots pine—were used, and the panels were manufactured using the pressing method. To determine the physical performance of the produced composite panels; moisture content, oven-dry density, air-dry density, and water absorption/thickness swelling tests were performed. According to the swelling test results, average values were recorded as 6.76% for the Oak-Veneered Composite Panel (OVCP), 7.40% for the Walnut-Veneered Composite Panel (WVCP), and 6.92% for the Scots Pine-Veneered Composite Panel (SPVCP). In physical analyses, average moisture values were measured as 1.44% (OVCP), 1.70% (WVCP), and 1.99% (SPVCP), respectively; while oven-dry density values were determined to be in the range of 0.873-0.896 g/cm³, and air-dry density values in the range of 0.903-0.930 g/cm³. The most significant output of the study is that the polyethylene within the TetraPak structure formed a strong bond with the wood material during pressing. This thermoplastic interaction provided adhesion without the need for additional glue, thereby reducing production costs and increasing the sustainability value of the material. The findings demonstrate that waste TetraPak packaging, together with natural wood veneers, can be used as an eco-friendly alternative in industrial panel production.

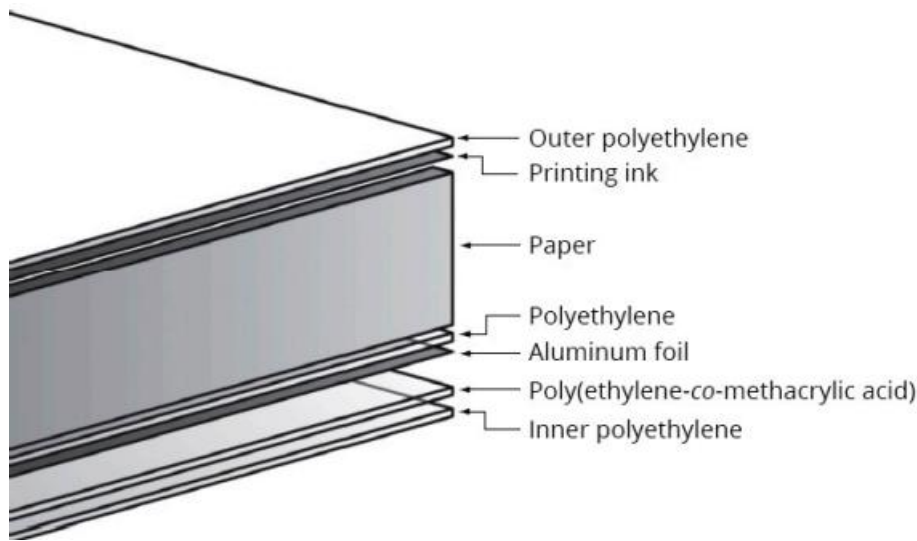
Keywords: Wood-plastic composite, TetraPak, adhesive-free production, recycling, sustainability.

1.GİRİŞ

21. Yüzyılın en büyük çevresel sorunlarından biri, nüfus, kentleşme ve tüketim artışlarıyla orantılı ilerleyiş gösteren katı atık miktarıdır. Bununla birlikte döngüsel ekonomiye katkı sağlamak amacıyla da geri dönüşüme yönelik tüm dünyada sürekli yeni yollar aranmaktadır. Dünyamızdaki sınırlı doğal kaynakların korunması ve çevre kirliliğinin azaltılması için “atık” kavramı “hammadde” olarak ele alınması gereklilik haline gelmiştir (Mısır ve Arıkan, 2022; Bilgili, 2023). Güncel pazar verileri, 2022 yılında dünya çapında yaklaşık 193 milyar TetraPak

ambalaj birimi satışı gerçekleşti 12milyar Avro gelir elde edildi ve 1.2 milyon ton ambalaj geri dönüşümü sağlandı (TetraPak, 2022). Bu devasa pazar payına rağmen, üretilen ambalajların ufak bir kısmı geri dönüşüm akışlarına dahil edilebildiği; geri kalan büyük bir kısmın ise depolama veya yakma yoluyla bertaraf edildiği bildirilmektedir (Recupido, 2023). Türkiye özneline değerlendirildiğinde T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan '2023 Yılı Atık İstatistik Bülteni' verilerine göre ; Atık Beyan Sistemi üzerinden beyanda bulunan 135.976 tesisten alınan veriler doğrultusunda, Türkiye'nin toplam katı atık hacminin 38.181.245 yıl/tona ulaştığı saptanmıştır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Kayıt dışı faktörler ve beyan edilmemiş atık kalemleri de göz önünde bulundurulduğunda, gerçek rakamların bu verilerin üzerinde olduğu öngörülmektedir (Enç vd., 2012).

Gıda sektöründe muhafaza etmede tek kullanımlık aseptik ambalaj Tetra Pak teknolojisinin gelişimi, İsveçli mühendis Ruben Rausing önderliğinde 1943 yılında başlamıştır. Marka adı, kartonların tetrahedral şeklinden esinlenerek 1944 yılında tescil edilen bu ambalajlar, süt ve türevi sıvı gıdaların verimli taşınması ve saklanması sayesinde küresel bir popülerlik kazanmıştır (Rancea, 2025). Gıda sektöründe yaygın olarak kullanılan bu kompozit içecek kartonları; tipik olarak %75 oranında kâğıt (selüloz elyaf), %20 oranında polietilen (PE) ve %5 oranında alüminyum (Al) içeriğine sahiptir (Ayrılmış vd., 2008; Robertson, 2021; Zawadiak vd., 2017). Ambalajın kompleks yapısındaki Al folyo; ışık, oksijen, su buharı ve mikroorganizmalara karşı mükemmel bir bariyer sağlarken; PE katmanları kâğıdı sıvıdan korumakta ve katmanları birbirine bağlayarak ısı yalıtıma olanak tanımaktadır (Zawadiak vd., 2017). Ancak bu bileşenlerin moleküler düzeyde birbirine sıkıca bağlı olması, klasik geri dönüşüm yöntemlerinde ayrıştırma işlemlerini oldukça pahalı ve karmaşık bir süreç haline getirmektedir (Rancea, 2025). Bu nedenle Tetra Pak atıklarının geri kazanımı ve yeniden değerlendirilmesi, sürdürülebilir atık yönetimi açısından önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Baltacı, 2023).



Görsel 1. Aseptik kartonun tipik yapısı (Robertson, 2021)

Tetra Pak atıklarının geri dönüşüm yöntemleri arasında en düşük maliyeti ve en yüksek sürdürülebilirliği sağlayabilecek yöntemlerden biri "yonga levha" üretimidir. Literatürde yapılan çalışmalar, bu atıkların parçalanarak sunta, yonga levha veya polimer kompozit üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Bal, 2022; Bhaskar vd., 2020). Ancak mevcut endüstriyel levha üretim süreçlerinin (MDF, OSB, yonga levha) büyük bir kısmı, insan sağlığına zararlı uçucu organik bileşikler (VOC) ve formaldehit içeren sentetik tutkalların kullanımına dayanmaktadır (Schwarzkopf ve Burnard, 2016). Bu nedenle daha çevreci, düşük emisyonlu ve sürdürülebilir alternatif malzeme üretim yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada; tek kullanımlık Tetra Pak atıkları ile estetik ve yapısal özelliklere sahip doğal ahşap kaplamaların, ambalajın kendi bünyesindeki polietileni bir bağlayıcı olarak kullanan "termoplastik laminasyon" yöntemiyle, ilave bir yapıştırıcı olmaksızın birleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu tutkalsız kompozit paneller; piyasadaki sentetik tutkal içerikli ürünlere çevreci, sağlıklı ve yüksek katma değerli bir alternatif sunmayı amaçlamaktadır.

2.MATERYAL VE METOD

2.1 Materyallerin Tedariki ve Hazırlanması

Araştırmada kullanılan TetraPak atıkları Bursa'da faaliyet gösteren TigerWood firmasından temin edilmiştir. Endüstriyel kırıcılardan geçirilerek belirli boyutlara getirilen atıklar presleme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Panellerin dış yüzey katmanlarını oluşturmak amacıyla Türkiye yerel ormanlarından elde edilen üç farklı ağaç türüne ait papel kaplamalar tercih edilmiştir: Yerli Meşe (*Quercus spp.*), Yerli Ceviz (*Juglans regia*) ve Sarıçam (*Pinus sylvestris*). Kaplamalar 0,6 mm sabit kalınlıkta olup, dikiş yöntemiyle birleştirilerek yüzey bütünlüğü sağlanmıştır.



Görsel 2. Uygulaması yapılmış kaplamalı levhalar

2.2 Üretim Süreci

Tutkalsız ahşap-plastik kompozit (APK) panellerin üretimi "sandviç panel" konseptiyle kurgulanmıştır. Alt ve üst yüzey kaplamalarının arasına, ön işlemden geçirilmiş Tetra Pak yongaları homojen bir şekilde serilmiştir. TetraPak içeriğindeki düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) erime karakteristiği ve ahşap dokusuna nüfuz kabiliyeti dikkate alınarak, pres sıcaklığı 180°C olarak optimize edilmiştir. Üretim; ara sıcak, ana sıcak, ana soğuk ve ara soğuk olmak üzere dört aşamalı bir presleme döngüsüyle gerçekleştirilmiştir. Uygulanan spesifik basınç ve süre parametreleri, eriyen LDPE fazının ahşap lümen boşluklarına nüfuz ederek "mekanik kilitlenme" (mechanical interlocking) yoluyla termoplastik bir etkileşim kurmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Süreçte hiçbir sentetik reçine veya ilave kimyasal bağlayıcı kullanılmamıştır. Üretilen paneller, testler öncesinde Gazi Üniversitesi Ağaçşeri Endüstri Mühendisliği laboratuvarında 20±2°C sıcaklık ve %65±5 bağıl nem koşullarında iklimlendirilerek denge rutubetine getirilmiştir.

2.3 Fiziksel Özellikler

2.3.1. Yoğunluk ve rutubet tayini

Deney örneklerinin yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla TS EN 323 (1999)'te belirtilen esaslara uyulmuştur. Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerine sırası ile Meşe Kaplamalı Kompozit Panel (MKKP), Ceviz Kaplamalı Kompozit Panel (CKKP) ve Sarıçam Kaplamalı Kompozit Panel (SKKP) olarak levhalar üretilmiştir. Üretilen levhalardan 5'er adet 50×50×12

mm ölçülerinde toplam 15 adet örnek hava kurusu yoğunluk, tamkuru yoğunluk ve rutubet değerleri için elde hazırlanmış, daha sonra bu örnekler $\pm 0,01$ g duyarlıklı terazi ile tartılmışlardır.

Böylece örneklerin rutubetli (W : %12 hava kurusu yoğunluğu) ağırlıkları (m_W) tespit edilmiştir. Daha sonra bu örneklerin boyutları $\pm 0,01$ mm duyarlıklı dijital kumpas ile ölçülerek hacimleri (V_W) hesaplanmıştır. %12'lik nem düzeyindeki (ρ_{12}) yoğunlukları eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$\rho_W = \frac{m_W}{a_W \times b_W \times l_W} = \frac{m_W}{V_W} (g/cm^3) \quad [1]$$

Deney örneklerinin Rutubetlerinin belirlenmesi amacıyla TS EN 322 (1999)'de belirtilen esaslarına uyulmuştur. Kurutmadan önce test parçasının başlangıç kütlesi (m_1), g cinsinden ve Deney parçasının fırında kurutulmuş kütlesi (m_2), g cinsindendir. Rutubetin belirlenmesi için;

$$W, \% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad [2]$$

eşitliği kullanılmıştır (eşitlik 2).



Görsel 3. Etüv içerisindeki numuneler

2.3.2 Kalınlığına Şişme ve Su Alma Performansı

Deney örneklerinin suya karşı boyutsal kararlılığının belirlenmesi amacıyla TS EN 317 'de belirtilen esaslara uyulmuştur. Test için her bir varyasyondan üretilen levhalardan 5'er adet $50 \times 50 \times 12$ mm ölçülerinde toplam 15 adet örnek kalınlığına şişme ve su alma değerleri için elde hazırlanmış daha sonra numuneler, test öncesinde $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem koşullarına sahip iklimlendirme odasında sabit ağırlığa ulaşana kadar bekletilmiştir. İklimlendirme sonrası numunelerin orta noktalarından $0,01$ mm hassasiyetli dijital kumpas ile başlangıç kalınlıkları (T_1) ölçülmüştür. Ardından numuneler, pH değeri nötr olan $20 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su banyosuna, birbirlerine ve tank yüzeyine temas etmeyecek şekilde dikey olarak daldırılmıştır. 24 saatlik daldırma süresi sonunda sudan çıkarılan numunelerin yüzeyindeki fazla su alınmış ve aynı ölçüm noktalarından son kalınlık (T_2) değerleri kaydedilmiştir. Kalınlığına şişme oranı (G), eşitlik 3'e göre yüzde (%) cinsinden hesaplanmıştır:

$$G, \% = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \times 100 \quad [3]$$

Deney örneklerinin Su alma (Water Absorption) oranının belirlenmesi amacıyla TS EN 317’ de belirtilen esaslarına uyulmuştur. Önce test parçasının başlangıç kütlesi (M_1), g cinsinden ve sudan çıkarılan numunelerin yüzeyindeki serbest su, kurutma kağıdı (kurutma tamponu) yardımıyla hızlıca uzaklaştırıldıktan sonra son kütle (M_2) g cinsindendir, tartımları yapılmıştır. Panellerin yüzde (%) cinsinden su alma oranları (W_a) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$W_a, \% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 [4]$$

eşitliği kullanılmıştır (eşitlik 4).

Bu test, Tetra Pak içeriğindeki LDPE ve alüminyum katmanlarının, dış yüzeydeki doğal ahşap kaplamalarla olan etkileşimini ve polimerin bir su bariyeri olarak etkinliğini sayısal olarak ortaya koymuştur.

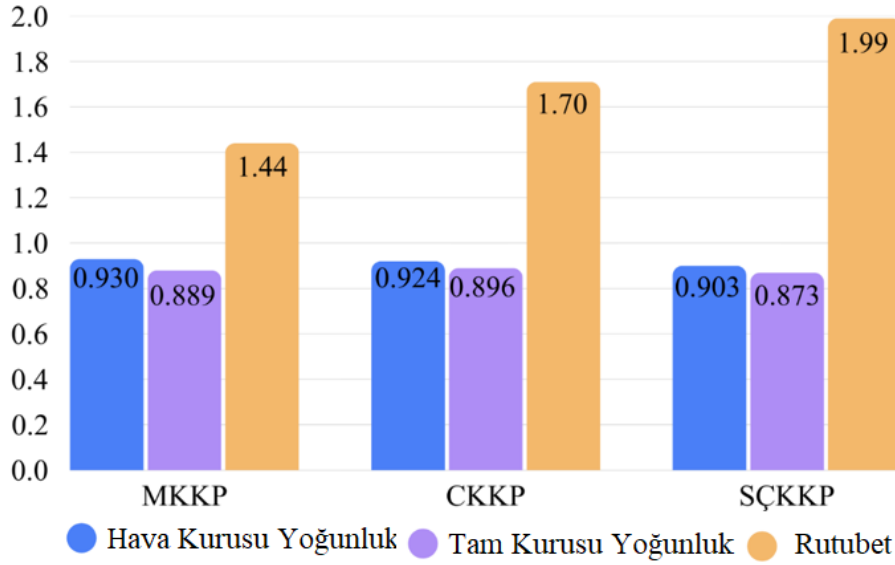
3.BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yoğunluk ve Rutubet Tayini

Malzemenin mekanik direncini ve boyutsal stabilitesini doğrudan etkileyen yoğunluk ve rutubet verileri Tablo 1’de ve Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerinin Temel Fiziksel Değerleri

Panel Tanımı	Tam Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Hava Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Rutubet (%)
MKKP	0.889	0.930	1.44
CKKP	0.896	0.924	1.70
SKKP	0.873	0.903	1.99



Şekil 1. : Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerinin Temel Fiziksel Özellikleri

Üretilen panellerin tam kuru yoğunluk değerleri 0,873-0,896 g/cm³ aralığında saptanmıştır. Bu değerler, malzemenin konvansiyonel MDF ve HDF levhalara eşdeğer veya daha yüksek bir yoğunluk karakteristiğine sahip olduğunu göstermektedir (Ayrılmış vd., 2008). Panellerin rutubet değerleri %1,44-1,99 aralığında olup, masif ahşabın standart değerlerinden (%8-12) önemli ölçüde düşüktür.

3.2 Kalınlığına Şişme ve Su Alma Performansı

TS EN 317 24 saatlik su alma testi sonuçlarına göre Tablo 2’de verilmiştir. Numunelerin kalınlığına şişme oranları %1.77-2.88 aralığında gerçekleşmiştir. Görsel.4’ de ise örneklerin deney öncesi ve sonrası görselleri verilmiştir.

Tablo2. Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerinin Şişme Değerleri

Panel Tanımı	Su alma(%)	24h Şişme (%)
MKKP	6.76	2.88
CKKP	7.40	1.77
SKKP	7.03	2.31

TS EN 312 standardına göre yük taşıyıcı levhalar için öngörülen limitlerin oldukça altında kalan bu performans, piyasadaki standart yonga levhaların (%12-15) yaklaşık iki katı daha iyi bir su direnci sunmaktadır. Bu durum, TetraPak içeriğindeki LDPE ve alüminyum katmanlarının

hidrofobik bir bariyer oluşturarak ahşap liflerinin su absorpsiyonunu sınırladığını kanıtlamaktadır (Zawadiak vd., 2017).



Görsel 4. Ahşap/TetraPak Kompozit Panellerin deney öncesi ve sonrası

Mevcut sektörel bazda inceleme sağlandığında dünyada yılda yaklaşık 36 milyon m³ OSB (Oriented Strand Board) üretilmektedir (WBPI, 2023). 1 m³ OSB üretimi için yaklaşık 1,8 - 2,0 m³ endüstriyel odun tüketilmektedir (CORRIM, 2021). Bu durum, her metreküp üretimde ortalama iki yetişkin ağacın kesilmesi anlamına gelmektedir. Buna karşın, geliştirilen APK panellerin üretimiyle, 1 m³ levha başına yaklaşık 8.000-10.000 adet atık kartonun düzenli depolama sahalarına gitmesi veya bozunma sürecinde atmosfere metan gazı salması önlenmektedir (IPCC, 2022). Küresel OSB üretiminin yalnızca %10'unun bu ileri dönüşüm ürünü kompozit levhalarla ikame edilmesi halinde, yıllık yaklaşık 7,2 milyon yetişkin ağaç kesilmekten kurtarılabilir. Bu kazanım, orman alanlarının yıllık ortalama büyüme kapasitesi olan 5,1 m³/ha verisi temel alındığında (LUKE, 2023), yıllık yaklaşık 1,4 milyon hektar orman alanının toplam büyüme hacmine eşdeğer bir ekosistem koruması sağlamaktadır.

Sürdürülebilir mimarlık ilkeleriyle uyum sergileyen bu ahşap plastik kompozit (APK) panel, döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda, “atık” sınıfındaki bir malzemenin yüksek katma değerli bir "hammadde" sınıfına başarıyla geçiş yaptığı görülmektedir (Najafi, 2013; Mısır ve Arıkan, 2022; Sev, 2009).

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Elde edilen bulgular, APK levhaların ilave bir yapıştırıcıya ihtiyaç duymaksızın "tutkalsız birleşmeyi" başarıyla gerçekleştirdiğini saptamıştır. Termoplastik bağlayıcılık görevini üstlenen TetraPak bünyesindeki LDPE (Düşük Yoğunluklu Polietilen), presleme sürecinde ahşap kaplamanın lümen boşluklarına nüfuz ederek güçlü bir mekanik tutunma (mechanical interlocking) sağlamıştır. TetraPak içeriğindeki polimerin doğal bağlayıcılığından faydalanılarak üretilen bu paneller, geleneksel levha üretimindeki formaldehit ve VOC (Uçucu Organik Bileşik) emisyonlarını tamamen elimine ederek insan sağlığına dost bir yapı

sergilemektedir (Robertson, 2021). Bu özellikleriyle ürün, sıfır atık ilkelerine uyumlu, yeşil bina sertifikasyon süreçlerinde (LEED, BREEAM vb.) güçlü bir aday konumuna gelmiştir. Panellerin TS EN standartlarında belirlenmiş fiziksel performans sınırlarına üstünlük sağlaması, piyasadaki konvansiyonel ürünlere (OSB, MDF, yonga levha) ciddi bir alternatif olabileceğini kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, APK panellerin fiziksel performans değerlerinin literatürdeki benzer çalışmalarla paralel ve hatta bazı parametrelerde (kalınlığına şişme direnci gibi) daha üstün sonuçlar vermesi, malzemenin endüstriyel ölçekte sürdürülebilir bir hammadde potansiyeli taşıdığını ve ticari ölçekte uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 2024/1. Döneminde TÜBİTAK tarafından desteklenen, 1919B012470092 numaralı, “Ahşap Laminasyonunda Plastik Eklemeli Kompozit Malzeme Kullanılması” adlı TÜBİTAK projesinden üretilmiştir. TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

5. KAYNAKÇA

1. Ayrilmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., & Bauchonguatana, P. (2008). Physical and mechanical properties of composite panels made from used beverage cartons. *Materials & Design*, 29(7), 1397–1403. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.01.014>
2. Bal, B. C. (2022). Lineer düşük yoğunluklu polietilen (LDYPE) ve odun unu ile üretilen kompozit malzemenin bazı mekanik özellikleri üzerine bir araştırma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 40-49.
3. Baltacı, I. (2023). *Atık Tetra Pak aseptik ambalajlarından karton, düşük yoğunluklu polietilen, alüminyum bileşenlerinin geri kazanımı* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
4. Bhaskar, K., Jayabalakrishnan, D., Kumar, M. V., Sendilvelan, S., ve Prabhakar, M. (2020). Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 2231–2234. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.577>
5. Bilgili, M. Y. (2023). Geri dönüşüm, döngüsel ekonomi ve sıfır atık odaklı bir model önerisi: Türkiye atık bankaları. L. Memiş ve M. Y. Bilgili (Ed.), *Dev kentlerin sessiz krizi: Atıklar içinde* (s. 1-22). Çizgi Kitabevi.
6. CORRIM. (2021). Life cycle assessment of oriented strand board (OSB) production. Consortium for Research on Renewable Industrial Materials. <https://corrim.org/wp-content/uploads/Module-E-OSB-Final-w-survey.pdf>

7. Enç, V., Uzun, S. E., & Hoşoğlu, F. (2012). Atık kompozit içecek kartonları geri dönüşüm yöntemleri. *Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 1(4), 184-194. [Özel Sayı: Tüketim Toplumu ve Çevre]. <https://doi.org/10.7596/taksad.v1i4.120>
8. IPCC. (2022). Waste management and methane emissions. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=120>
9. LUKE. (2023). Forest growth rate and volume of growing stock. Natural Resources Institute Finland. <https://www.luke.fi/en/news/forest-growth-rate-decelerated-volume-of-growing-stock-increased>
10. Mısıır, A. ve Arıkan, O. A. (2022). Sıfır atık yönetimi ve döngüsel ekonomi. *TÜBA Yayınları*, s. 205-223. <https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-57-3.ch11>
11. Najafi, S. K. (2013). Use of recycled plastics in wood-plastic composites – A review. *Waste Management*, 33(9), 1898–1905. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017>
12. Rancea, M., Nemeş, O., & Bizo, L. (2025). Thermal behaviour of composite materials obtained from recycled Tetra Pak® by thermoplastic forming. *Studia UBB Chemia*, 70(1), 23–34. <https://doi.org/10.24193/subbchem.2025.1.02>
13. Robertson, G. L. (2021). Recycling of aseptic beverage cartons: A review. *Packaging Technology and Science*, 34(6), 325–342. <https://doi.org/10.1002/pts.2562>
14. Recupido, F., Lama, G. C., Lavorgna, M., Buonocore, G. G., Marzella, R., & Verdolotti, L. (2023). Post-consumer recycling of Tetra Pak®: Starting a “new life” as filler in sustainable polyurethane foams. *Food Packaging and Shelf Life*, 40, 101175. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101175>
15. Schwarzkopf, M. J., ve Burnard, M. D. (2016). Wood-plastic composites—Performance and environmental impacts. R. Kutnar ve S. S. Muthu (Ed.), *Environmental impacts of traditional and innovative forest-based bioproducts* içinde (s. 19–43). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0655-5_2
16. Sev, A. (2009). *Sürdürülebilir mimarlık*. YEM Yayınları.
17. Tetra Pak. (2022). *Sustainability Report FY22: Collection and Recycling*. Tetra Pak Group.
18. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Atık istatistikleri bülteni*. <https://webdosya.cs.gov.tr/v2/ced/2025/12/2023-y-l-at-k-istatistik-b-lteni-005-2-20251226151737.pdf>
19. Türk Standardları Enstitüsü. (1999). *TS EN 317: Yonga levhalar ve lif levhalar - Su içerisine daldırıldıktan sonra şişme tayini*.
20. Türk Standardları Enstitüsü. (1999). *TS EN 322: Ahşap esaslı levhalar - Rutubet miktarının tayini*.
21. Türk Standardları Enstitüsü. (1999). *TS EN 323: Ahşap esaslı levhalar - Birim hacim ağırlık (yoğunluk) tayini*.
22. Türk Standardları Enstitüsü. (2012). *TS EN 312: Yonga levhalar - Özellikler*.
23. Zawadiak, J., Wojciechowski, S., Piotrowski, T., & Krypa, A. (2017). Tetra Pak recycling – Current trends and new developments. *American Journal of Chemical Engineering*, 5(3), 37–42. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170503.12>
24. WBPI. (2023, 14 Eylül). OSB still a top performer. Wood Based Panels International. <https://www.wbpionline.com/analysis/osb-still-a-top-performer-9728235/>

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE GERÇEK VE SİMÜLASYON TABANLI TESİSLERDE PERFORMANS ANALİZİ

Şeyma BİLGİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi,
seymabilgin61@gmail.com - 0009-0003-7082-2712

Dr. Öğr. Üyesi Yahya DANAYİYEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi,
yahya@ktu.edu.tr - 0000-0002-8679-4088

ÖZET

Güneş enerji santrallerinde (GES) tasarım aşamasında kullanılan simülasyon yazılımları, yatırım kararlarının alınması ve üretim projeksiyonlarının oluşturulması açısından temel araçlar arasında yer almaktadır. Ancak simülasyon tabanlı üretim tahminlerinin gerçek işletme verileri ile ne ölçüde örtüştüğü, tesis performansının doğru değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, güneş enerji santrallerinde gerçek üretim verileri ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak performans analizine odaklanmaktadır.

Araştırma kapsamında farklı iklim bölgelerinde yer alan fotovoltaik tesisler HelioScope, Global Solar Atlas (GSA) ve JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) yazılımları kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon çıktıları, işletmede bulunan tesislerden elde edilen evirici üretim verileri ve sayaç ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Performans değerlendirmesi özgül üretim (kWh/kWp) değerleri üzerinden aylık ve yıllık bazda gerçekleştirilmiş, simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verileri arasındaki sapma oranları hesaplanarak model doğruluğu nicel olarak ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgular, simülasyon yazılımlarının yıllık üretim tahminlerinde genel olarak kabul edilebilir doğruluk seviyelerine ulaştığını; ancak aylık bazda iklimsel değişkenlik, sıcaklık etkileri ve bölgesel ışınım farklılıklarına bağlı olarak üretim değerlerinde belirgin sapmalar oluşabildiğini göstermektedir. Nitekim yıllık bazda Aktaş-1 tesisinde HelioScope sonucu evirici verisine göre %23,98 oranında pozitif sapma gösterirken, Ç. Kardeşler tesisinde bu oran %26,00 seviyesine ulaşmıştır. Buna karşılık Gündoğdu-2 tesisinde GSA ile gerçek evirici verisi arasındaki fark yalnızca -%0,12 düzeyinde gerçekleşmiştir. Çalışma sonucunda, gerçek saha verileri ile desteklenmeyen simülasyon tahminlerinin tek başına yeterli olmayabileceği ve performans analizlerinde çok boyutlu değerlendirme yaklaşımının gerekli olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerji santrali, Performans analizi, Simülasyon yazılımları, Özgül üretim, Sapma analizi

1.GİRİŞ

Enerji, ekonomik büyüme, sanayileşme ve toplumsal sürdürülebilirliğin sağlanması açısından temel bir gereksinimdir. Sanayi Devrimi'nden itibaren hızlanan sanayileşme, nüfus artışı ve kentleşme süreçleri enerji talebinin önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. Günümüzde enerji üretimi büyük ölçüde fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerjiye dayanmaktadır (Güner ve ark., 2021; Kocalmış Bilhan ve Emikönel, 2021). Enerji kaynakları genel olarak tükenebilir fosil yakıtlar ile doğal döngüler içerisinde kendini yenileyebilen kaynaklar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır (Taghiyev, 2023). Bununla birlikte fosil yakıtların neden olduğu sera gazı emisyonları, çevresel bozulma ve sürdürülebilirlik sorunları enerji sistemlerinde daha temiz ve sürdürülebilir alternatiflere yönelimi hızlandırmıştır (Akarsu, 2025; Kayışoğlu ve Diken, 2019).

Yenilenebilir enerji kaynakları; hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi farklı enerji türlerini kapsamaktadır (Sayyadov, 2023). Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel enerjisinin türbin-jeneratör sistemleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanır (Bodur ve Şenyuva, 2013). Rüzgâr enerjisi atmosferde oluşan hava akımlarının kinetik enerjisinin türbinler aracılığıyla elektrik üretiminde kullanılmasını esas almaktadır (Oral ve Behçet, 2015). Güneş enerjisi, güneşten gelen elektromanyetik ışıının fotovoltaik sistemler aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesine imkân tanımaktadır (İnce, 2021; Kılıç, 2015). Jeotermal enerji yer kabuğunun derinliklerinde depolanan ısıının değerlendirilmesiyle elektrik ve ısı üretimi sağlayan bir enerji kaynağıdır (Acar ve Köseoğlu, 2021; Kozak, 2020). Biyokütle enerjisi ise tarımsal ve organik atıkların çeşitli dönüşüm süreçleri sonucunda enerjiye dönüştürülmesine dayanmaktadır (Demir, 2017; Bayraç ve Özarslan, 2018).

Son yıllarda yenilenebilir enerji teknolojilerinde yaşanan gelişmeler ve maliyet düşüşleri, bu kaynakların küresel enerji sistemleri içerisindeki payının giderek artmasına katkı sağlamaktadır (Şencan, 2022; Yıldız ve ark., 2020). Bu gelişmeler doğrultusunda güneş enerjisi; bol bulunabilirliği, sürdürülebilir yapısı ve düşük çevresel etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde öne çıkan bir enerji türü hâline gelmiştir. Güneş enerjisi fotovoltaik sistemler aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmekte ve enerji üretiminde önemli bir alternatif sunmaktadır (Güner ve ark., 2021).

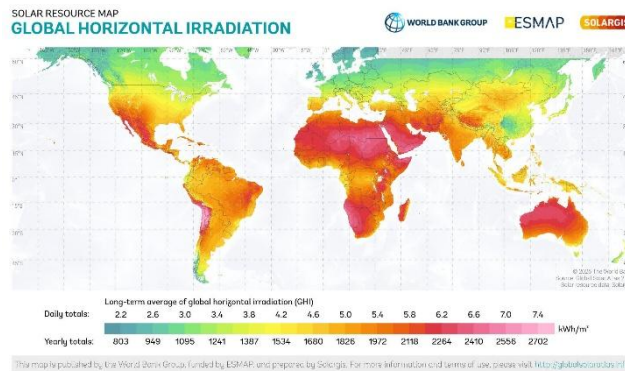
Güneş enerjisi, Güneş'in merkezinde gerçekleşen nükleer füzyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan enerjinin elektromanyetik dalgalar hâlinde yeryüzüne ulaşmasıyla oluşmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Fotovoltaik sistemlerde elektrik üretimi yarı iletken malzemelerde meydana gelen fotovoltaik etki sayesinde gerçekleşmekte; gelen fotonların oluşturduğu elektron-boşluk çiftleri p-n birleşimi yardımıyla ayrıştırılarak doğru akım elde edilmektedir (Öztürk, 2017). Bununla birlikte hücre sıcaklığı, güneş ışıını ve çevresel koşullar gibi parametreler güneş enerji santrallerinin gerçek saha performansını doğrudan etkilemektedir (Öztürk, 2017).

Güneş enerjisinden etkin biçimde yararlanabilmek için güneş geometrisinin doğru şekilde tanımlanması gerekmektedir. Enlem açısı bir noktanın Dünya üzerindeki konumunu belirler ve

güneş ışınlarının geliş açısını doğrudan etkiler (Jacobson, 2005). Deklinasyon açısı, Güneş ışınlarının ekvator düzlemi ile yaptığı açıyı ifade etmekte olup yıl boyunca $-23,45^\circ$ ile $+23,45^\circ$ arasında değişmektedir (Jacobson, 2005). Saat açısı güneşin gün içerisindeki konumunu tanımlamakta ve güneşin doğuş ile batış zamanlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır (Görcelioğlu, 1987). Zenit açısı güneş ışınlarının düşey doğrultu ile yaptığı açıyı ifade ederken ışınımın yüzeye ne kadar dik geldiğini göstermektedir (Duffie ve Beckman, 2013). Yükseklik (altitude) açısı ise güneşin ufuk düzlemi ile yaptığı açı olup zenit açısının tamamlayıcısıdır (Duffie ve Beckman, 2013). Azimut açısı ise güneşin yatay düzlemdeki yönünü tanımlamakta ve fotovoltaik panellerin yöneliminin belirlenmesinde temel bir parametre olarak kullanılmaktadır (Görcelioğlu, 1987; Duffie ve Beckman, 2013).

Güneş ışınımı doğrudan (direkt), yayılı (difüz) ve yansıyan (albedo) bileşenlerden oluşmakta olup bu bileşenlerin toplamı küresel ışınım olarak adlandırılmaktadır (Kabakcı ve Eke, 2018; Kaysal ve Hocaoglu, 2023). Bu nedenle güneş geometrisi ve radyasyon bileşenlerinin doğru modellenmesi, gerçek ve simülasyon tabanlı tesis performanslarının karşılaştırılmasında kritik öneme sahiptir.

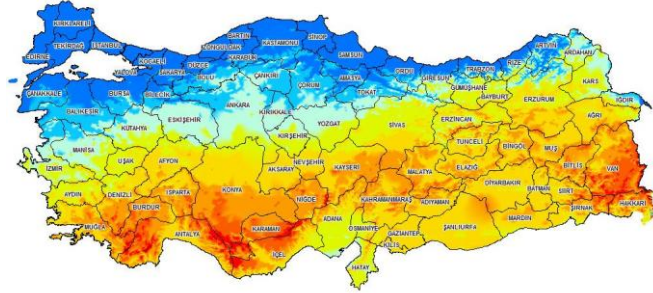
Dünya genelinde güneş enerjisi potansiyeli enlem, iklim tipi ve atmosferik koşullara bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Özellikle 40° kuzey ve 40° güney enlemleri arasında kalan bölgeler, yüksek güneşlenme süresi ve yüksek küresel yatay ışınım (Global Horizontal Irradiation – GHI) değerleri sayesinde fotovoltaik enerji üretimi açısından avantajlı alanlar olarak öne çıkmaktadır (Taşkın ve Korucu, 2014). Bu kuşak içerisinde yer alan Sahra Altı Afrika, Orta Doğu, Avustralya ve Güney Amerika'nın bazı bölgeleri yıllık ışınım değerlerinin yüksek olması nedeniyle dünya ölçeğinde en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip bölgeler arasında değerlendirilmektedir. Küresel yatay ışınımın uzun dönem ortalama dağılımını gösteren dünya güneş enerjisi potansiyel haritası Görsel 1'de sunulmakta olup, harita özellikle söz konusu enlem kuşağında güneş enerjisi potansiyelinin belirgin biçimde yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (World Bank Group, 2020).



Görsel 1. Dünya Geneline Küresel Yatay Işınımın (GHI) Uzun Dönem Yıllık Ortalama Dağılımı, (World Bank Group, 2020)

Türkiye coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre Türkiye’de günlük ortalama güneşlenme

süresi yaklaşık 7,5 saat olarak hesaplanmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, GEPA). GEPA verileri Türkiye genelinde güneş enerjisi potansiyelinin bölgesel olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymakta; özellikle Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve İç Anadolu'nun güney kesimlerinde yıllık güneş ışıınım değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye'de güneş enerjisi potansiyelinin mekânsal dağılımını gösteren harita Görsel 2'de sunulmakta olup, harita ülke genelinde güneş enerjisi potansiyelinin özellikle güney ve iç bölgelerde daha yüksek seviyelerde olduğunu ortaya koymaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, GEPA).



Görsel 2. Türkiye’de Uzun Dönem Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası, (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, GEPA)

Kurulu güç gelişimi incelendiğinde Türkiye’de güneş enerjisi kapasitesinin son yıllarda önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Temmuz 2022’de yaklaşık 9,7 GW olan kurulu güç, 2024 yılı sonunda 19,6 GW seviyesini aşmıştır (Ember, 2025). Bu artışta özellikle çatı tipi ve öztüketim odaklı lisanssız fotovoltaik projelerinin önemli rol oynadığı görülmektedir (Ember, 2025). Türkiye’de elektrik üretim altyapısının kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde hidroelektrik, güneş, doğal gaz ve rüzgâr enerjisinin kurulu güç içerisinde önemli paylara sahip olduğu görülmektedir. Türkiye’de elektrik kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı Çizelge 1’de sunulmakta olup, veriler güneş enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payının %20’nin üzerine çıkarak Türkiye elektrik sisteminde önemli bir konuma ulaştığını göstermektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2026).

Çizelge 1. 2025 Yılı Aralık Ayı Sonu İtibariyle Elektrik Kurulu Gücünün Kaynaklara Göre Dağılımı (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2026)

Kaynak	Kurulu Güç (MW)	Pay (%)
Hidroelektrik	32.294	26,4
Güneş	25.109	20,5
Doğal Gaz	24.232	19,8
Rüzgâr	14.774	12,1
Yerli Kömür	11.550	9,4
İthal Kömür	10.456	8,5
Biyokütle	2.346	1,9

Jeotermal	1.758	1,4
Toplam	122.519	%100

Ulusal Enerji Planı kapsamında 2035 yılına kadar güneş ve rüzgâr enerjisinde toplam 120 GW kurulu güce ulaşılması hedeflenmekte olup bunun yaklaşık 53 GW'lık kısmının güneş enerjisinden sağlanması öngörülmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022) ve aynı zamanda 2030 yılına kadar güneş enerjisinin Türkiye'nin elektrik ihtiyacının yaklaşık %30'unu karşılayabileceği öngörülmektedir (Yılmaz, 2024). Bu hedefler doğrultusunda güneş enerjisi Türkiye'nin enerji arz güvenliği, dışa bağımlılığın azaltılması ve sürdürülebilir enerji dönüşümü açısından stratejik bir kaynak olarak değerlendirilmektedir.

Bu teknik ve yapısal çerçeve, güneş enerji santrallerinde simülasyon temelli üretim tahminleri ile gerçek performans verilerinin karşılaştırılmasına yönelik analizlerin teorik altyapısını oluşturmaktadır.

Türkiye'de elektrik üretiminde kullanılan kaynakların kurulu güç dağılımı incelendiğinde, güneş enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payının yaklaşık %20,5 seviyesine ulaştığı ve kurulu gücün 25.109 MW düzeyine çıktığı görülmektedir. Bu durum, güneş enerjisinin Türkiye elektrik sisteminde giderek daha önemli bir konuma geldiğini göstermektedir. Nitekim Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan verilere göre, güneş enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payı son yıllarda hızla artmış ve toplam kurulu gücün yaklaşık beşte birine ulaşmıştır.

Güneş enerjisi santralleri farklı uygulama tiplerinde kurulabilmekte olup, bunlardan biri de çatı tipi fotovoltaik sistemlerdir. Çatı tipi güneş enerjisi sistemleri; dağıtık üretim yapıları, tüketim noktasına yakın kurulmaları ve iletim-dağıtım kayıplarını azaltmaları gibi avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, diğer güneş enerjisi santral türlerinde olduğu gibi çatı tipi sistemlerin kurulumu öncesinde de güneşlenme potansiyeli, çatı yönelimi ve eğimi, gölgelenme etkileri, taşıyıcı sistem uygunluğu ve elektriksel altyapı gibi teknik parametrelerin detaylı şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

Simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verilerinin karşılaştırılması; yatırım öncesinde amortisman süresinin belirlenmesi, uygun malzeme seçiminin yapılması ve kurulacak sistem kapasitesinin toplam elektrik ihtiyacını ne ölçüde karşılayabileceğinin tespit edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla fotovoltaik sistemlerin performansının değerlendirilmesine yönelik olarak literatürde ve uygulamada çeşitli analiz yöntemleri ve simülasyon araçları geliştirilmiştir.

Fotovoltaik (FV) sistemlerin performans analizi ve enerji üretim tahminlerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla literatürde çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların önemli bir kısmında simülasyon yazılımları ile elde edilen üretim değerleri ile gerçek santral üretim verileri karşılaştırılarak sistem performansı analiz edilmiştir.

Tanış ve Altıntaş tarafından gerçekleştirilen çalışmada Elâzığ ilinde kurulu 1036,8 kWp gücündeki bir fotovoltaik güneş enerji santralinin ölçülen üretim verileri ile PVsyst simülasyon

programı kullanılarak elde edilen üretim tahminleri karşılaştırılmış ve yıllık özgül üretim değerleri arasında yaklaşık %4,73'lük bir fark olduğu belirlenmiştir (Tanış ve Altıntaş, 2023).

Benzer şekilde Şahin ve Salihmuhsin tarafından yapılan çalışmada Kahramanmaraş ili Göksun ilçesinde bulunan 1179 kWp kurulu güce sahip bir güneş enerji santralinin gerçek üretim verileri ile PVsyst simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve iki veri seti arasında oldukça düşük seviyede (%0,203) bir sapma olduğu tespit edilmiştir (Şahin ve Salihmuhsin, 2024).

Dundar ve Şeker tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise Sivas Cumhuriyet Üniversitesi kampüsünde planlanan 278 kWp gücündeki çatı tipi fotovoltaik sistem için PVsyst simülasyonu yapılmış ve simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verileri karşılaştırılarak yaklaşık %0,56'lık bir fark elde edilmiştir (Dundar ve Şeker, 2025).

Literatürde bazı çalışmalarda ise fotovoltaik sistem performansı farklı panel teknolojileri açısından değerlendirilmiştir. İzgi ve Özcan tarafından yapılan çalışmada Bursa ilinde kurulu 1 MW gücündeki bir fotovoltaik sistemde monokristal, polikristal ve ince film panel teknolojileri karşılaştırılmış ve farklı panel teknolojilerinin yıllık üretim performansları PVsyst ve PVSOL simülasyon ortamında analiz edilmiştir (İzgi ve Özcan, 2020). Ancak bu çalışmada elde edilen sonuçlar tamamen simülasyon verilerine dayandırılmış olup gerçek üretim verileri ile karşılaştırma yapılmamıştır.

Bazı araştırmalarda ise sistem performansı yerine tasarım parametreleri incelenmiştir. Yağlı ve Koç tarafından yapılan çalışmada Gaziantep bölgesi için fotovoltaik panellerin optimum eğim açısının belirlenmesi amaçlanmış ve Perez transpozisyon modeli kullanılarak optimum eğim açısı yaklaşık 31° olarak hesaplanmıştır (Yağlı ve Koç, 2020). Ancak bu çalışmada analizler yalnızca tek bir bölge üzerinden gerçekleştirilmiş olup sadece PVsyst simülasyonu kullanıldı fakat gerçek üretim verileri kullanılmamıştır.

Diğer taraftan literatürde yer alan bazı tez çalışmalarında gerçek üretim verileri ile farklı simülasyon yazılımlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Örneğin Konya ili koşullarında gerçekleştirilen bir tez çalışmasında 1 MW kurulu güce sahip bir güneş enerji santralinin üretim verileri ile PVsyst ve PVSOL simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve yazılımların üretim tahmin doğruluğu değerlendirilmiştir (Üründü, 2025).

Benzer şekilde Antalya ilinde gerçekleştirilen bir başka tez çalışmasında ise çatı tipi bir güneş enerji santralinin gerçek üretim verileri ile PVsyst ve PVSOL simülasyon sonuçları karşılaştırılarak sistem performansı analiz edilmiştir (Akarsu, 2025).

Literatürdeki bu çalışmalar incelendiğinde, analizlerin büyük çoğunluğunun tek bir güneş enerji santrali üzerinden gerçekleştirildiği, kullanılan simülasyon araçlarının ise genellikle bir veya iki yazılım ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Ayrıca bazı çalışmalarda yalnızca simülasyon verileri kullanılmış olup gerçek üretim verileri ile doğrulama yapılmamıştır. Bu durum, elde edilen sonuçların farklı tesisler ve farklı coğrafi koşullar için genellenebilirliğini sınırlamaktadır.

Bu çalışmada ise literatürdeki bu sınırlılıkların giderilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda farklı coğrafi koşullara sahip beş farklı güneş enerji santraline ait gerçek üretim verileri kullanılmış ve bu veriler HelioScope, PVGIS ve Global Solar Atlas tabanlı üç farklı simülasyon yöntemi ile elde edilen üretim tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece yalnızca tek bir tesis üzerinden gerçekleştirilen çalışmalardan farklı olarak daha geniş bir veri seti ve üç farklı simülasyon araçlarının doğruluğu değerlendirilmiştir böylece elde edilen sonuçların daha genellenebilir ve güvenilir olması hedeflenmiştir.

2.SİMULASYON ÇALIŞMALARI

Güneş enerji santrallerinde simülasyon çalışmaları, yatırım öncesinde üretim tahmini yapılması ve sistem tasarımının optimize edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu yazılımlar; coğrafi konum, meteorolojik veriler, panel–evirici seçimi ve sistem kayıpları gibi parametreleri dikkate alarak aylık ve yıllık üretim projeksiyonları oluşturmaktadır. Bu çalışmada, HelioScope (Aurora Solar, 2025). Global Solar Atlas (GSA) (World Bank Group, 2024) ve PVGIS (European Commission, 2024) yazılımları kullanılarak farklı tesisler modellenmiş; elde edilen simülasyon sonuçları gerçek evirici üretim verileri ile karşılaştırılmıştır. Böylece simülasyon tabanlı tahminlerin saha performansı ile uyumu değerlendirilmiş ve yazılımlar arasındaki farklılıklar analiz edilmiştir.

HelioScope, detaylı saha modellemesine imkân tanıyan ve gölgeleme analizlerini üç boyutlu ortamda gerçekleştirebilen bir simülasyon yazılımıdır. Panel yerleşimi, evirici konfigürasyonu, DC/AC oranı ve sistem kayıpları ayrıntılı biçimde tanımlanabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde HelioScope sonuçları, gerçek tesis performansına en yakın referans değer olarak değerlendirilmiş ve diğer yazılımların sonuçları ile karşılaştırma amacıyla temel alınmıştır.

Global Solar Atlas (GSA), küresel ölçekte güneş ışıınımı verilerine dayanan ve özellikle global yatay ışıınım (GHI) değerleri üzerinden üretim tahmini yapan bir platformdur. GSA, saha bazlı detaylı tasarım yerine ışıınım temelli potansiyel analizi sunmaktadır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, diğer simülasyon yazılımlarına kıyasla daha genel karakterlidir. Çalışmada GSA verileri, diğer simülasyon çıktıları ve gerçek üretim değerleri ile karşılaştırılarak sapma oranları değerlendirilmiştir.

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen ve geniş kapsamlı meteorolojik veri tabanına dayanan bir çevrimiçi simülasyon platformudur. Sistem parametrelerinin daha genel düzeyde tanımlandığı bu yazılım, özellikle bölgesel üretim potansiyelinin hızlı şekilde değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. PVGIS çıktıları, HelioScope sonuçları ve gerçek evirici verileri ile karşılaştırılarak modelleme doğruluğu analiz edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında öncelikle farklı coğrafi bölgelerde yer alan beş adet lisanssız güneş enerji santraline ait gerçek üretim verileri ile simülasyon tabanlı üretim tahminleri karşılaştırılmıştır. Analiz sürecinde HelioScope, Global Solar Atlas (GSA) ve PVGIS olmak üzere üç farklı simülasyon yazılımı kullanılmış ve her bir tesis için elde edilen simülasyon çıktıları gerçek evirici üretim verileri ile karşılaştırılarak performans değerlendirmesi

yapılmıştır. Böylece farklı simülasyon araçlarının üretim tahmin doğruluğu çoklu tesis verileri üzerinden incelenmiş ve simülasyon sonuçları ile saha performansı arasındaki farklar nicel olarak ortaya konmuştur. Bu kapsamda her bir tesis için simülasyon ve gerçek üretim değerleri arasındaki sapma oranları (%) hesaplanarak yazılımların üretim tahmin doğruluğu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada ise simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verileri arasındaki uyumun en yüksek olduğu tesis belirlenmiş ve bu tesis için daha detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilgili santral için aylık bazda Global Solar Atlas simülasyon çıktıları, evirici üretim verileri ve dağıtım şirketine ait üretim sayacı ölçümleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sayesinde yalnızca simülasyon ve gerçek üretim arasındaki ilişki değil, aynı zamanda evirici üretim verileri ile şebeke üretim sayacı ölçümleri arasındaki uyum da değerlendirilmiştir. Ayrıca aylık üretim değerleri üzerinden yapılan analizlerde dönemsel sapmalar incelenmiş ve simülasyon tahminlerinin yıl içindeki doğruluk seviyeleri değerlendirilmiştir.

Gerçek üretim verileri ile simülasyon çıktılarının birlikte değerlendirilmesi, güneş enerji santrallerinin yatırım öncesi fizibilite çalışmalarında önemli bir karar destek aracı sunmaktadır. Bu tür analizler sayesinde kurulması planlanan sistemin yıllık üretim potansiyeli, geri ödeme süresi (amortisman) ve öz tüketim–mahsuplaşma senaryoları kurulum öncesinde öngörülebilmektedir. Ayrıca üretim fazlasının şebekeye satılması veya tüketim ile dengelenmesi gibi farklı işletme senaryoları da simülasyon ortamında analiz edilebilmekte ve yatırımcıların daha doğru kapasite ve sistem tasarımı kararları almasına katkı sağlamaktadır.

2.1. Güneş Enerji Santrallerinin Sistem Girdileri

Sivas (Aktaş-1) Erzurum (Erko-1), Erzincan (Çadırtepe Kardeşler), Trabzon (Gündoğdu-2) ve Kocaeli (Anonim-1) illerinde kurulu tesislere ait evirici üretim kayıtları ve yıllık toplam üretim değerleri analiz edilmiştir. Gündoğdu-2 GES evirici üretim verileri ile EDAŞ tek yönlü üretim verileri ayrıca karşılaştırılmıştır. Çizelge 2’de tesislere ait HelioScope, Global Solar Atlas ve PVGIS’te kullanılan sistem parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2. Farklı İllerdeki 5 Adet Çatı GES İçin Sistem Parametreleri

Tesis Adı (GES)	İl	AA/DA Güç	Azimut(lar) (°)	Çatı Eğimi (°)
Aktaş-1	Sivas	60/72,80	177°	12°
Erko-1	Erzurum	240/288,50	198° ve 287,1°	14°
Ç. Kardeşler	Erzincan	60/71,89	115° ve 290°	9°
Gündoğdu-2	Trabzon	1100/1463	74° ve 254°	14°
Anonim-1	Kocaeli	600/703,8	149° ve 329°	6°

Çizelge 2’de verilen sistem parametreleri incelendiğinde, farklı illerde kurulu beş adet çatı tipi GES’in hem kurulu güç hem de yönelim–eğim açısından birbirinden farklı tasarım özelliklerine sahip olduğu görülmektedir. Kurulu güç bakımından en yüksek kapasiteye sahip tesis

Gündoğdu-2 (Trabzon) olup 1100/1463 kW AA/DA değerine sahiptir. En düşük kurulu güçler ise 60–72 kW aralığında olan Aktaş-1 (Sivas) ve Ç. Kardeşler (Erzincan) tesislerinde görülmektedir. DA/AA oranları incelendiğinde tüm tesislerde evirici kapasitesine kıyasla panel gücünün daha yüksek seçildiği, yani bilinçli bir panel gücünün, evirici gücünden fazla uygulandığı anlaşılmaktadır. Bu yaklaşım özellikle düşük ışıyım saatlerinde eviricinin daha verimli çalışmasını sağlamak amacıyla tercih edilmektedir.

Azimut açıları değerlendirildiğinde tesislerin büyük kısmında çift yönlü (doğu-batı veya farklı cephe kombinasyonlu) yerleşim tercih edildiği görülmektedir. Gündoğdu-2 tesisinde 74° ve 254° yönelimleri belirgin bir doğu-batı yerleşimini göstermekte olup özellikle çatı uygulamalarında yaygın bir çözümdür. Çatı eğimleri ise 6° ile 14° arasında değişmekte; en düşük eğim Anonim-1 (Kocaeli) tesisinde, en yüksek eğimler ise 14° ile Erko-1 (Erzurum) ve Gündoğdu-2 (Trabzon) tesislerinde görülmektedir. Bu farklılıklar hem bölgesel enlem koşulları hem de mevcut çatı mimarisi ile ilişkilidir. Genel olarak tablo, tesis performans analizlerinde yönelim, eğim ve DA/AA oranı gibi tasarım parametrelerinin simülasyon sonuçları ile gerçek üretim değerleri arasındaki sapmalar üzerinde belirleyici olabileceğini göstermektedir.

2.2. Güneş Enerji Santrallerinin Sistem Çıktıları

Bu bölümde, farklı illerde konumlanan ve çatı tipleri, yönelimleri (azimut), eğim açıları ve çevresel koşulları bakımından birbirinden ayrılan beş adet güneş enerjisi santraline ait simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır ve elde edilen veriler Çizelge 3'te gösterilmiştir. İncelenen tesisler; sanayi çatısı, depo çatısı ve ticari yapı çatısı gibi farklı geometrilere sahip olup, her biri kendi özel saha koşulları altında değerlendirilmiştir.

Çizelge 3. Tesislerin Simülasyon Sonuçları ve Gerçek Verileri

Tesis Adı (GES)	HelioScope Yıllık Üretimi (kWh)	GSA Yıllık Üretimi (kWh)	PVGIS Yıllık Üretimi (kWh)	Evirici 2025 Yıllık Üretimi (kWh)
Aktaş-1	122.064	109.523	107.607	98.460
Erko-1	462.200	414.111	330.066	422.751
Ç.Kardeşler	109.952	105.548	98.855	87.260
Gündoğdu-2	1.707.329	1.432.395	1.362.860	1.434.100
Anonim-1	843.434	794.624	798.048	772.445

Öncelikle genel eğilim incelendiğinde HelioScope sonuçlarının tüm tesislerde en yüksek üretim tahminini verdiği görülmektedir. GSA ve PVGIS değerleri ise çoğunlukla birbirine daha yakın olup HelioScope'a göre daha konservatif sonuçlar üretmiştir. Bu durum, HelioScope'un detaylı saha modellemesi (gölgeleme, string yerleşimi, kayıp kalemlerinin ayrı ayrı tanımlanması) sayesinde daha iyimser fakat saha koşullarına bağlı olarak sapma gösterebilen sonuçlar üretmesiyle ilişkilendirilebilir.

Erko-1 GES özelinde evirici üretimi (422.751 kWh), HelioScope tahmininden düşük, GSA tahminine oldukça yakın ve PVGIS tahmininden belirgin şekilde yüksektir. Bu durum, PVGIS'in özellikle iki farklı azimutlu çatı geometrisini tam temsil edememesi ve sistem kayıplarını daha genel varsayımlarla hesaplamasından kaynaklanabilir. Erko-1 için gerçek üretim, simülasyon ortalamalarına yakın bir değer sergileyerek modelleme doğruluğunun kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.

Aktaş-1 GES tesislerinde evirici üretimi, PVGIS ve GSA sonuçlarına oldukça yakın seyretmektedir. Bu durum küçük güçteki çatı sistemlerinde genel varsayımların sahayı daha doğru temsil ettiğini göstermektedir. Sapmaların düşük olması, sistem kayıplarının simülasyon varsayımlarıyla uyumlu olduğunu düşündürmektedir.

Gündoğdu-2 GES'te evirici üretimi (1.434.100 kWh), GSA ve PVGIS sonuçlarına oldukça yakın olup HelioScope tahmininden düşüktür. Bu tesis büyük ölçekli olduğundan, simülasyon–gerçek üretim arasındaki yüzdesel fark daha sınırlı kalmıştır. Ayrıca bu tesis için çift yönlü sayaç verisi bulunması, ilerleyen analizlerde evirici–şebeke ölçümü karşılaştırmasının yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Anonim-1 GES'te evirici üretimi, üç yazılımın ortalamasına oldukça yakındır. Bu durum sistem tasarım parametrelerinin (azimut, eğim ve DA/AA oranı) saha koşullarını doğru temsil ettiğini göstermektedir.

Büyük ölçekli tesislerde (Gündoğdu-2) GSA'nın saha verisine en yakın tahmini verdiği görülmektedir. Buna istinaden ay bazında üretim verilerinin karşılaştırması GSA ve Gündoğdu-2 GES üzerinden incelenecektir. Tablo 4'te Gündoğdu-2 GES için GSA, evirici üretim verileri ve EDAŞ tek yönlü üretim sayacı karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 4. Gündoğdu-2 GES GSA, Evirici ve EDAŞ Üretim Sayacı Aylık Verileri

Aylar	GSA (kWh)	2025 Evirici (kWh)	Üretim Sayacı (kWh)
Ocak	59.148,80	70.620,00	72.124,88
Şubat	77.584,00	56.300,00	60.098,80
Mart	112.930,60	137.000,00	137.183,20
Nisan	143.479,10	109.550,00	112.662,40
Mayıs	175.675,40	187.130,00	190.396,80
Haziran	182.097,30	202.260,00	202.100,00
Temmuz	177.080,60	166.610,00	170.389,20
Ağustos	151.121,10	151.940,00	152.077,20
Eylül	130.902,10	129.300,00	129.298,00
Ekim	98.533,10	95.610,00	97.738,80
Kasım	70.364,30	78.030,00	77.725,20

Aralık	53.479,40	49.750,00	49.349,20
Toplam	1.432.395,80	1.434.100,00	1.451.759,20

Çizelge 4'te Gündoğdu-2 GES için GSA simülasyon verileri, 2025 evirici üretim değerleri ve EDAŞ tek yönlü üretim sayacı verileri aylık bazda karşılaştırılmıştır. Yıllık toplam değerlere bakıldığında GSA 1.432.395 kWh, evirici 1.434.100 kWh ve üretim sayacı 1.451.759 kWh üretim göstermektedir. Bu sonuçlar, GSA ile evirici verisi arasında yalnızca yaklaşık %0,12 düzeyinde çok düşük bir sapma bulunduğunu; sayaç verisinin ise evirici değerinden yaklaşık %1,2 oranında daha yüksek gerçekleştiğini göstermektedir. Yıllık bazda değerlendirildiğinde GSA tahmininin oldukça başarılı ve gerçek üretime yakın olduğu söylenebilir.

Aylık dağılım incelendiğinde ise dönemsel sapmaların daha belirgin olduğu görülmektedir. Özellikle şubat ayında GSA değeri evirici üretimine kıyasla belirgin şekilde yüksek tahmin üretmiş; buna karşılık mart ve haziran aylarında evirici ve sayaç verileri GSA tahmininin üzerinde gerçekleşmiştir. Yaz aylarında (haziran–temmuz–ağustos) üç veri setinin birbirine oldukça yakın olduğu, özellikle ağustos ve eylül aylarında farkların minimum seviyeye indiği dikkat çekmektedir. Kış aylarında (ocak, şubat, aralık) ise meteorolojik değişkenlik ve bulutluluk etkisi nedeniyle sapmaların arttığı görülmektedir.

Evirici ve EDAŞ üretim sayacı değerleri genel olarak birbiriyle oldukça uyumludur; aradaki küçük farklar ölçüm noktası farklılığı, reaktif/aktif enerji hesap yöntemleri veya sistem içi kayıplardan ya da kısa süreli internet kopukluklarından kaynaklanabilir. Genel değerlendirme olarak, Gündoğdu-2 GES özelinde GSA simülasyon çıktılarının yıllık üretim tahmininde yüksek doğruluk sağladığı; ancak aylık bazda özellikle düşük ışınlım dönemlerinde sapmaların artabildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durum, simülasyon sonuçlarının yatırım öncesi güvenilir bir referans sunduğunu ancak aylık performans analizlerinde gerçek saha verileri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Evirici 2025 yıllık üretim verileri referans alınarak yapılan sapma analizinde, simülasyon yazılımları arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. HelioScope tüm tesislerde pozitif sapma üretmiş ve evirici verilerine kıyasla sistematik olarak daha yüksek üretim tahmininde bulunmuştur. Bu durum, yazılımın detaylı saha modellemesi ve kayıp parametrelerinin kullanıcı tarafından tanımlanmasına imkân vermesi nedeniyle daha iyimser sonuçlar üretmesiyle ilişkilendirilebilir. GSA sonuçları ise bazı tesislerde evirici verilerine oldukça yakın değerler sunmuş; özellikle Gündoğdu-2 tesisinde sapma oranı ihmal edilebilir seviyede gerçekleşmiştir. PVGIS ise bazı tesislerde temkinli tahminler üretmiş, Erko-1 tesisinde ise belirgin negatif sapma göstermiştir. Küçük ölçekli tesislerde (Aktaş-1 ve Ç. Kardeşler) sapma oranlarının daha yüksek çıkması, saha koşullarına bağlı kayıpların ve gerçek işletme parametrelerinin simülasyon varsayımlarından farklılaşabileceğini göstermektedir. Çizelge 5'te evirici 2025 yıllık üretim değerlerini referans alarak sapma oranları verilmiştir.

Çizelge 5. Tesislerin Sapma Oranları

Tesis Adı (GES)	HelioScope	GSA	PVGIS
Aktaş-1	+23,98 %	+11,23 %	+9,29 %
Erko-1	+9,33 %	-2,04 %	-21,93 %
Ç. Kardeşler	+26,00 %	+20,96 %	+13,29 %
Gündoğdu-2	+19,05 %	-0,12 %	-4,97 %
Anonim-1	+9,19 %	+2,87 %	+3,31 %

Elde edilen bulgular, simülasyon yazılımlarının yıllık üretim tahminlerinde genel olarak kabul edilebilir doğruluk seviyelerinde sonuç verdiğini; ancak yazılımların modelleme yaklaşımı ve veri tabanı farklılıklarına bağlı olarak sistematik sapmalar oluşabildiğini göstermektedir. Bu nedenle yatırım ve performans değerlendirme süreçlerinde simülasyon sonuçlarının tek başına yeterli olmayacağı, gerçek evirici verileri ile doğrulanmasının teknik açıdan gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, HelioScope'un sunduğu özelleştirilmiş parametre seçimi teknik bir üstünlük sağlasa da sahadaki gerçek üretimi temsil eden evirici verilerinin genellikle muhafazakâr PVGIS ile iyimser HelioScope arasında bir denge noktasında ve GSA'ya çok yakın konumlandığı söylenebilir.

KAYNAKÇA

- Acar, S. ve Köseoğlu, H., Jeotermal Suların Uygulama Alanları ve Çevresel Problemler, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Kasım, Özel Sayı 28, 325-332, 2021.
- Akarsu, E., Çatı Tipi Güneş Enerji Santralının Üretim ve Simülasyon Verilerinin Karşılaştırılması: Antalya İli Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, 2025.
- Arı, F. ve Yılmaz, V., Türkiye’de ve Dünya’da Enerji Kaynaklarının Genel Görünümü ve Alternatif Enerji Kaynaklarının Önemi, Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Aralık, 34, 496-519, 2023.
- Aurora Solar, HelioScope Solar Design Software, Aurora Solar Inc., San Francisco.
- Bayraç, H.N. ve Özarslan, B., Biyokütle Enerjisi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkinin Ampirik Bir Analizi: Türkiye Örneği, Yalova Sosyal Bilimler Dergisi, Ekim, 8(17), 1-17, 2018.
- Bodur, G. ve Şenyuva, E., Üniversite Öğrencilerinin Hidroelektrik Enerji Santrallerine (HES) İlişkin Görüşleri ile Çevreye Yönelik Tutumları Arasındaki İlişki, Cumhuriyet International Journal of Education, Cilt 2, Sayı 4, 27–38, 2013.

- Demir, M., Kars İlinin Biyokütle Enerji Potansiyeli ve Kullanılabilirliği, Türk Coğrafya Dergisi, Haziran, 68, 31-41, 2017.
- Duffie, J. A. ve Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition, Wiley, New York, 2013.
- Dündar, H. K., & Şeker, M., Feasibility analysis of rooftop solar PV systems on a university campus: A case study of Sivas Cumhuriyet University. Journal of Engineering Faculty, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2025.
- Ember, Türkiye Surpasses 2025 Solar Target as Capacity Doubles in 2.5 Years, Ember Climate, London, 2025.
- Energy Institute (EI), Statistical Review of World Energy: 2025, 74th Edition, Energy Institute, London, 2025.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik Üretim ve Tüketiminde Rekor, 2026.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Güneş Enerjisi Bilgi Merkezi, Ankara.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA), Ankara.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Ulusal Enerji Planı (2020-2035), Ankara, 2022.
- ESMAP, Global Photovoltaic Power Potential by Country, World Bank Group, Washington DC, 2020.
- European Commission – Joint Research Centre, PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System, European Commission, 2024.
- Görcelioğlu, E., Güneş Açılırları ve Bunların Peyzaj Düzenlemelerindeki Önemi, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi Seri B, Haziran, 36(3), 33-52, 1987.
- Gümüş, B.S., Güneş Kapasitesi 2,5 Yılda İki Katına Çıkararak 2025 Hedefini Aştı, Ember Enerji Analizi, Ocak, 2025.
- Güner, E.D., Tekin, S., Çilek, A. ve Ünal Çilek, M., Güneş Enerjisi Santrali için Uygun Alanların CBS Tabanlı AHP Yöntemi ile Belirlenmesi: Mersin İli Örneği, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Mart, 36(1), 11–24, 2021.
- IEA, Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028, IEA Publications, Ocak, 2024.
- IRENA, Renewable Capacity Statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024.
- İnce, İ.T., Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretiminde Örnek Uygulamalar, Disiplinlerarası Yenilik Araştırmaları Dergisi, Nisan, 1(1), 1-10, 2021.

- İzgi, E., & Özcan, Ö., Şebekeye bağlı fotovoltaik çatı sisteminin karşılaştırmalı performans analizi. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi (KSU Journal of Engineering Sciences), 23(3), 2020.
- Jacobson, M. Z., Fundamentals of Atmospheric Modeling, Cambridge University Press, 2005.
- Kabakcı, M. ve Eke, R., Seasonal Variation of the Spectral Irradiance for the Province of Muğla, Muğla Journal of Science and Technology, Ekim, 4(2), 231-235, 2018.
- Kayıoğlu, B. ve Diken, B., Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kullanımının Mevcut Durumu ve Sorunları, Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, Haziran, 15(2), 61-65, 2019.
- Kaysal, K. ve Hocaoglu, F.O., Modelling of Different Mother Wavelet Transforms with Artificial Neural Networks for Estimation of Solar Radiation, Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering, 24(2), 141-154, 2023.
- Kılıç, F.Ç., Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, Mühendis ve Makina, Aralık, 56(671), 28-40, 2015.
- Kocalmış Bilhan, A. ve Emikönel, S., Nevşehir İli Güneş Enerji Potansiyelinin Analizi ve Kurulu Güneş Enerji Santralleri, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Nisan, Özel Sayı 24, 289-294, 2021.
- Kozak, M., Denizli İli Jeotermal Enerji Kaynakları ve Kullanım Alanlarının Araştırılması, YEKARUM e-DERGI, Haziran, 5(1), 1-11, 2020.
- Külekçi, Ö.C., Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, Aralık, 1(2), 83-91, 2009.
- Oral, F. ve Behçet, R., Rüzgâr Verilerinin Enerji Üretimi Amaçlı Değerlendirilmesi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Aralık, 4(2), 173-182, 2015.
- Özbay, H. ve Karafıl, A., Bilecik İli için Güneş Enerji Santrali Maliyet Analizi, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, Kasım, 6(2), 497-508, 2019.
- Öztürk, H.H., Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler, EMO Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 2017.
- REN21, Renewables 2023 Global Status Report: Global Overview, REN21 Secretariat, Paris, 2023.
- REN21, Solar PV, Renewables 2025 Global Status Report, REN21 Secretariat, Paris, 2025.
- Sayyadov, M., Günümüzde Enerji Politikaları ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Azerbaycan'da Yenilenebilir Enerji Sektörünün Gelişimi ve Rüzgar Enerji Türbini

- Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2023.
- Şahin, Z. R., & Salihmuhsin, M., Gerçekten sanala: 1 MWp güneş santralinin PVsyst simülasyon programıyla performans analizi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 203–215, 2024.
- Şencan, D., Yenilenebilir Enerjide Türkiye'nin Dünyadaki Yeri ve Uygulanan Teşviklerin Değerlendirilmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Temmuz, 15(3), 693-709, 2022.
- Taghiyev, A., Enerji Santrallerinin Sosyo-Ekonomik Yararları ve Doğaya Verdiği Zararların Karşılaştırılmalı Analizi: Neom Şehir Projesi Örneği, Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi, Ekim, 6(3), 610-625, 2023.
- Tanış, Z., & Altıntaş, N., Elâzığ ilinde şebekeye bağlı 1036,8 kWp fotovoltaik güneş enerjisi santralının ölçülen ve simüle edilen performans verilerinin analizi. EMO Bilimsel Dergi, 13(2), 2023.
- Taşkın, O. ve Korucu, T., Kahramanmaraş İli Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Kullanım Olanakları, KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, Aralık, 17(4), 12-16, 2014.
- Uğurlu, Ö., Türkiye’de Çevresel Güvenlik Bağlamında Sürdürülebilir Enerji Politikaları, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2006.
- Üründü, M. E., Şebekeye bağlı 1 MW kurulu güçteki güneş enerji santralinin PVsyst ve PVSol ile performans analizi (Yüksek lisans tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2025.
- Vaziri, R., Solar Energy in Kurdistan, Iraq: A Comprehensive Review of Economic and Environmental Implications, Policies, and Advancements, International Journal of Kurdish Studies, Mart, 10(1), 47-74, 2024.
- World Bank Group, ESMAP ve Solargis, Global Photovoltaic Power Potential by Country, Global Solar Atlas, Washington DC, 2020.
- World Bank Group, ESMAP ve Solargis, Global Solar Atlas – Solar Resource Map, Washington DC, 2024.
- Yağlı, H., & Koç, Y., Gaziantep bölgesi için güneş enerjisinden elektrik üretiminde kurulacak panellerin optimum eğim açılarının belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (19), 475–483, 2020.
- Yıldız, Ö.F., Yılmaz, M., Çelik, A. ve İmik, E., Havalimanlarında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması, Journal of Aviation, Haziran, 4(1), 162-174, 2020.

Yılmaz, M. (2024). Elektroeğirme yöntemiyle fotovoltaiik panellerde verim artırıcı kaplamalar (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

SYNTHESIS OF MOFS@COTTON MATERIALS AS PHOTOCATALYST

Dr., Gizem Saygı

İzmir Institute of Technology,

gizemsaygi@iyte.edu.tr- 0000-0002-6146-9588

Prof. Dr., Fehime Çakıcıoğlu Özkan

İzmir Institute of Technology,

fehimeozkan@iyte.edu.tr- 0000-0003-3991-7652

ABSTRACT

Metal organic frameworks (MOFs), a prominent class of porous crystal structures, have attracted interest for the considerations of sustainable energy and environmental remediation. MOFs has exhibited photocatalytic properties due to highly crystalline porous networks, very large surface area, doping with heteroatoms, adjustable pore size, tailored structures with ease, high pore volume, and very low density. However, the application of the Ti- and Zn- based MOFs as photocatalysts has been limited in literature yet.

In the present study, Ti- and Zn- based MOFs (Ti-TPA and Zn-TPA) photocatalysts were synthesized and immobilized on the cotton fabric as a functional porous support material to simple use in photoreactors and increasing the adsorption ability of target pollutants. The synthesized photocatalysts were characterized by the ATR-IR, SEM and BET analyses. The existence of the strong (28.75 wt%) Zn peaks have been observed by SEM-EDX analysis for the Zn-TPA@cotton material. The surface of Ti-TPA@cotton includes the % 5.05 wt of Ti measured by the EDX analysis. The novel Zn-TPA@cotton and Ti-TPA@cotton composite photocatalysts are expected to exhibit high photocatalytic performance.

Keywords: metal organic framework, photocatalyst coating, cotton fabric, titanium dioxide

INTRODUCTION

Metal organic frameworks (MOFs), appearing as a hybrid porous material with many ideal properties combining organic ligands with metal ions, open a new perspective to reach optimized capability for the environmental remediation as photocatalyst. MOFs provide superior specific surface area, and large volumes, including highly interconnected 3D open cavities, allowing light to easily penetrate, enhancing light-harvesting efficiency, rising the accessibility of the active sites for reactant pollutants [1]. Nevertheless, the application of MOFs as photocatalyst is still limited.

MOFs such as Ti-TPA and Zn-TPA are excellent adsorbents and efficient photocatalysts, however, they present in powder form, which causes them to make it difficult to use in practical applications. Powder form of Ti-TPA and Zn-TPA could cause easy agglomeration and many separation adversities. Thereof, it is necessary to immobilize Ti-TPA and Zn-TPA on support materials. The deposition of MOFs on the support materials such as cotton fabric, zeolites, pulp and carbon materials ensure significant functions of composites, i.e. increasing adsorption ability and improving photocatalytic activities.

The aim of the study is to synthesize the novel Ti- and Zn- based MOFs photocatalysts to use in environmental remediation. The Ti-based MOF (Ti-TPA) and Zn-based MOF (Zn-TPA) photocatalysts were deposited on the porous support material like cotton fabric. The immobilization success has been proven by ATR-IR, SEM and EDX analysis.

MATERIALS AND METHODS

Synthesis of Ti- and Zn- based MOFs

Synthesis of Ti-TPA: Terephthalic acid (TPA) was dissolved in DMF:MeOH mixture and titanium isopropoxide were added and stirred. The solution was reacted at 120 °C during 3 days in autoclave. The obtained Ti-TPA was centrifuged, and solids were washed with the solvent three times. Afterthat, Ti-TPA was dried at vacuum.

Synthesis of Zn-TPA: TPA and zinc acetate were dissolved in DMF and stirred for 30 minutes. The reaction was carried out at 120 °C in reactor. The solution was centrifuged and solids were washed by stirring with DMF. By using soxhlet system, solids washed with methanol. Then, Zn-TPA was dried at vacuum.

Coating of Ti-TPA and Zn-TPA on cotton fabric by layer-by-layer method

Carboxymethylated cotton fabric was prepared by using the method proposed by Rubin et al [2]. Ti-TPA and Zn-TPA were deposited on the carboxymethylated cotton by layer-by-layer coating. The metal and ligand solutions were prepared separately. For Zn-TPA coating, zinc-containing solution was prepared using DMF and zinc acetate. Ligand-containing solution was arranged using TPA and DMF. The carboxymethylated cotton fabric was dipped into these

solutions consecutively. After coating, the cotton was washed with ethanol. Ti-TPA and Zn-TPA coated cottons were entitled as Ti-TPA@cotton and Zn-TPA@cotton, respectively.

RESULT AND DISCUSSION

Characterization of the MOFs@Cotton Materials

Carboxymethylation of cotton was verified by comparing raw and the carboxymethylated fabrics using ATR-IR spectroscopy. The peak at 1630 cm^{-1} demonstrates the presence of the C=O bond at the carboxymethylation fabric. The intensity of OH at 3370 cm^{-1} is decreased due to the carboxylation [2].

The relation between Ti-TPA and Zn-TPA and carboxymethylated cotton was investigated by ATR-IR analysis (Figure 1-2). The ATR-IR spectrum of cotton fibers indicated characteristic bands at about $3370\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ (due to -OH stretching), $1500\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ (due to C–H vibration) and $1300\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ (due to C–O vibration) [3]. The bands were also shown in Ti-TPA@cotton and Zn-TPA@cotton materials. Carboxymethylation and deposition of the fibers could not to disappear of the characteristic peaks.

The ATR-IR spectra of Ti-TPA and Ti-TPA@cotton demonstrated that Ti-TPA had the peak at the $400\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ ascribed to Ti-OC vibration [4], which have not shown in Ti-TPA@cotton spectra (Figure 1).

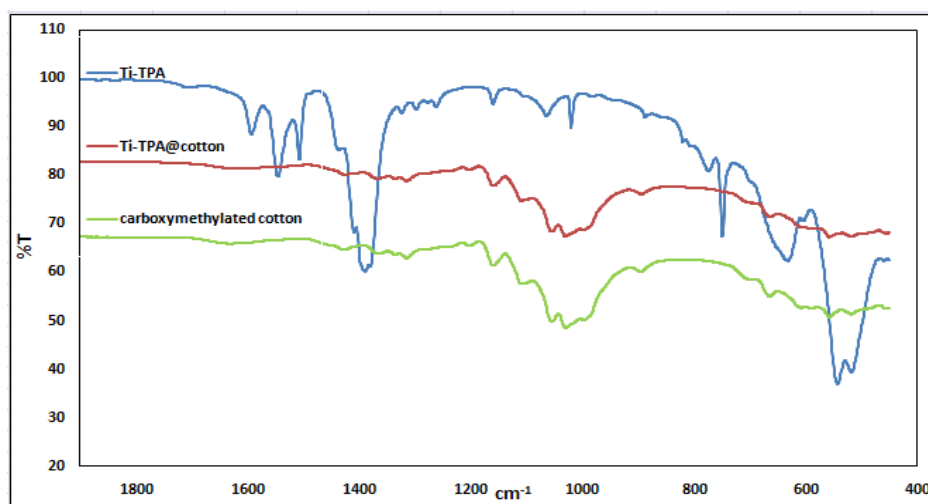


Figure 1. ATR-IR spectra of Ti-TPA, the carboxymethylated cotton and Ti-TPA deposited cotton

The ATR-IR spectra of Zn-TPA and Zn-TPA@cotton were shown in Figure 2. The asymmetric stretching of carboxylic acid in TPA was proven with the peaks of 1501 and 1575 cm^{-1} , while the symmetrical stretching was proven with peaks at 1379 cm^{-1} . The peaks at $800\text{--}750\text{ cm}^{-1}$ showed that 1,4-substitution of phenyl ring is emphasised with two out of aromatic C-H plane [5]. All these peaks in IR spectra of Zn-TPA and Zn-TPA@cotton indicated successful coating of the Zn-TPA onto the cotton fabric.

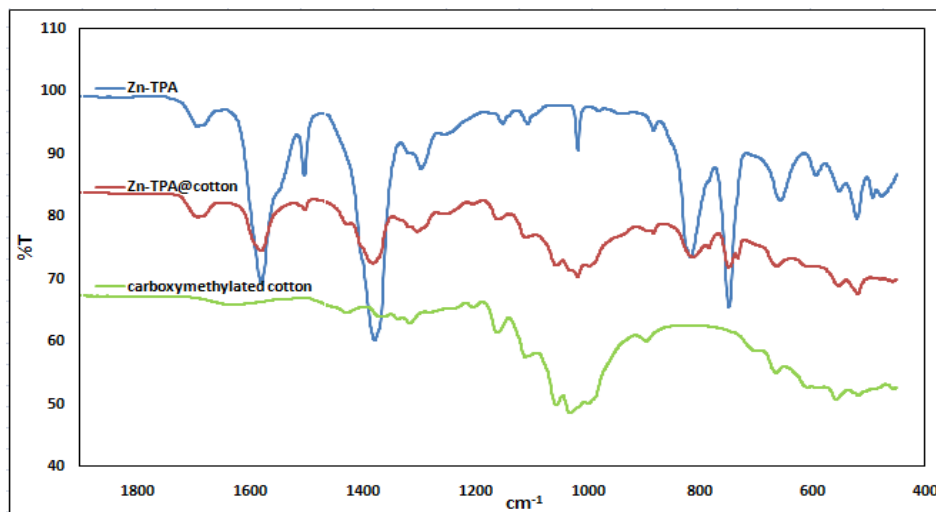


Figure 2. ATR-IR spectra of Zn-TPA, the carboxymethylated cotton and Zn-TPA deposited cotton

The surface morphology of Ti-TPA@ cotton and Zn-TPA@ cotton was investigated by SEM and the results were shown in Figure 3. Figure 3 showed that the fiber surfaces of raw cotton fabric were smooth. After deposition steps, Ti-TPA and Zn-TPA covered the cotton surface (Figure 3b, 3c)

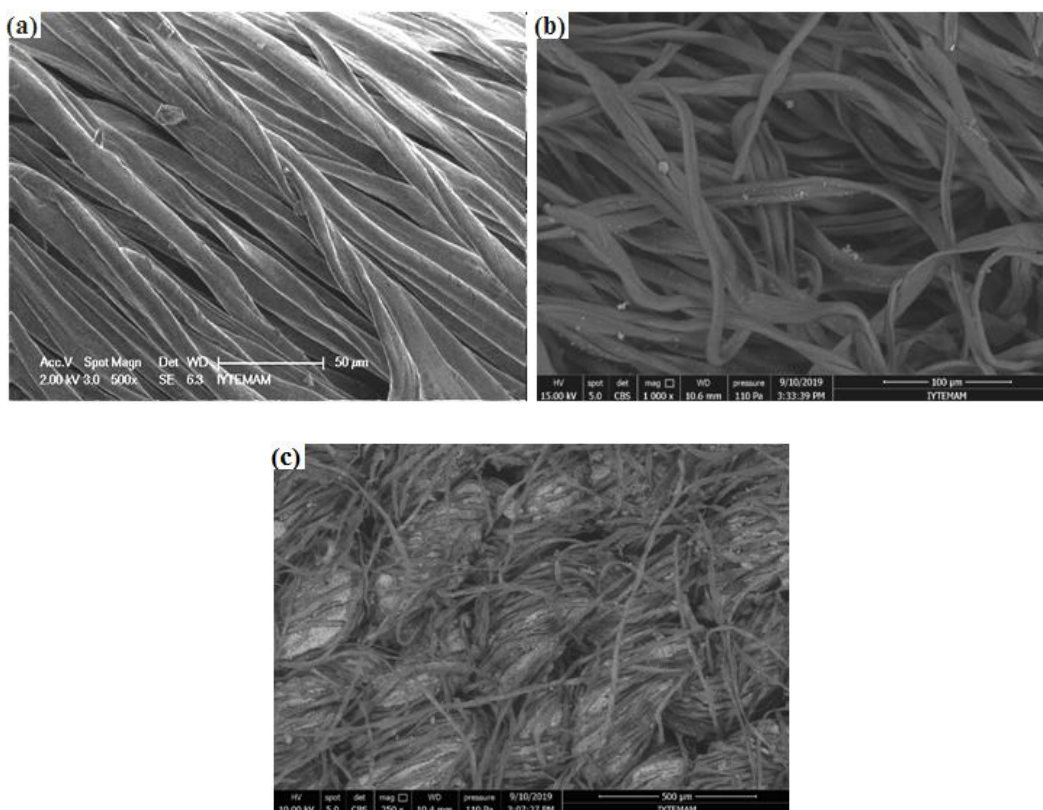


Figure 3. SEM images of a) raw cotton, b) Ti-TPA@ cotton and c) Zn-TPA@ cotton

According to SEM-EDX results (Figure 4-5), the major components were C, O and Al for both MOFs deposited on fibers. Additionally, the existence of the metal ion was based on the

deposited materials. When the fabric was coated with Ti-TPA, some nanoparticles that contain Ti were observed on cotton surface (Figure 4). Although IR could not prove the deposition of the Ti-TPA on cotton, there were Ti-based components covering the cotton fibers and the surface enclosed the % 5.05 wt of Ti characterized by the EDX.

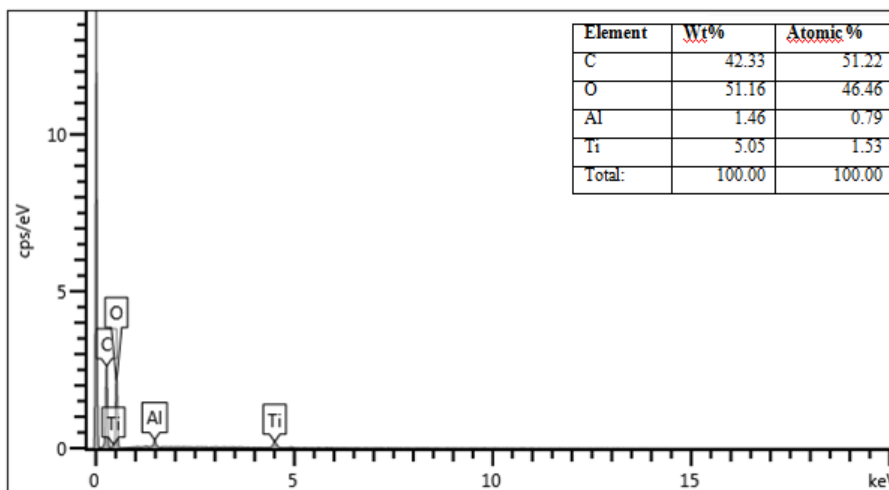


Figure 4. SEM-EDX results of Ti-TPA@cotton

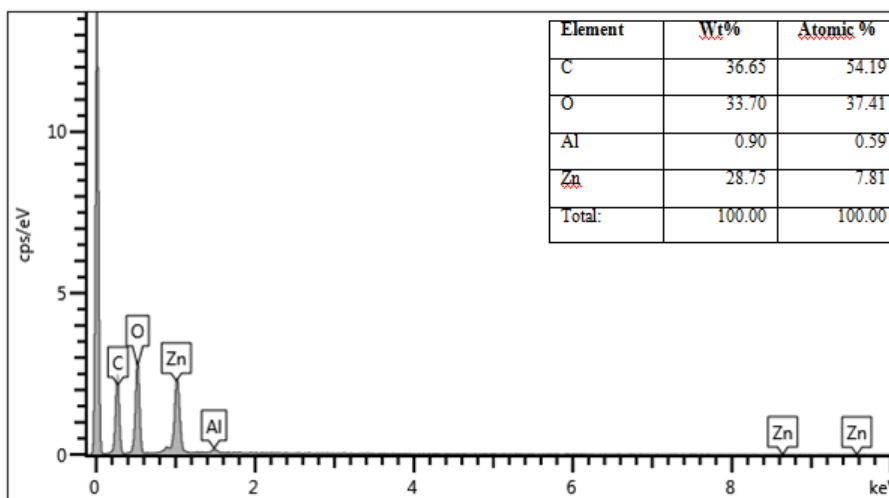


Figure 5. SEM-EDX results of Zn-TPA@cotton

Figure 3c demonstrated that Zn-TPA was collected around the cotton fibers almost homogenously. In addition, the appearance of the main Zn peaks (Figure 5) was monitored by EDX analysis (28.75 wt%).

CONCLUSION

The synthesis of the Ti- and Zn- based MOFs was performed successfully. Then the deposition of Ti- and Zn- based MOFs on the cotton fiber were accomplished to use as a novel photocatalyst. The chemical surface modification of cotton was essential to gain efficient coverage of MOFs. Thereof, the cotton fabrics were carboxymethylated by using the sodium

chloroacetate existence of sodium hydroxide to get more carboxyl groups for better deposition of Ti-TPA and Zn-TPA on the cotton. Then, layer by layer method was utilized to coat Ti-TPA and Zn-TPA on the cotton. Especially, Zn-TPA was immobilized successfully on the cotton fiber surface. The SEM images of Zn-TPA@ cotton exhibited regularly distributed MOF coating on cotton.

REFERENCES

1. Yao, P., Liu, H., Wang, D., Chen, J., Li, G., An, T.: Enhanced visible-light photocatalytic activity to volatile organic compounds degradation and deactivation resistance mechanism of titania confined inside a metal-organic framework. *J. Colloid Interface Sci.* 522, 174–182 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.03.075>
2. Rubin, H.N., Neufeld, B.H., Reynolds, M.M.: Surface-Anchored Metal-Organic Framework-Cotton Material for Tunable Antibacterial Copper Delivery. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 10, 15189–15199 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsami.7b19455>
3. Jia, M., Zhang, X.F., Feng, Y., Zhou, Y., Yao, J.: In-situ growing ZIF-8 on cellulose nanofibers to form gas separation membrane for CO₂ separation. *J. Memb. Sci.* 595, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117579>
4. Han, X., Yang, X., Liu, G., Li, Z., Shao, L.: Boosting visible light photocatalytic activity via impregnation-induced RhB-sensitized MIL-125(Ti). *Chemical Engineering Research and Design.* 143, 90–99 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.01.010>
5. Yang, H.M., Liu, X., Song, X.L., Yang, T.L., Liang, Z.H., Fan, C.M.: In situ electrochemical synthesis of MOF-5 and its application in improving photocatalytic activity of BiOBr. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition).* 25, 3987–3994 (2015). [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)64047-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)64047-X)

NANO PEKTİNİN YAPISAL, KOLLOİDAL VE FOTO-DUYARLI MIS ARAYÜZEY DAVRANIŞININ ÇOK YÖNLÜ KARAKTERİZASYONU

YASEMİN ERHAN

Batman Üniversitesi,

sinemmm_yasmin@hotmail.com- 0009-0003-2929-9886

Prof. Dr. OSMAN PAKMA

Batman Üniversitesi,

opakma@gmail.com- 0000-0002-3098-0973

Prof. Dr. İ. AFŞİN KARİPER

Erciyes Üniversitesi,

akariper@gmail.com- 0000-0001-9127-301X

ÖZET

Bu çalışmada nano pektinin yapısal, morfolojik, kolloidal, optik ve elektriksel özellikleri bütüncül bir yaklaşımla incelenmiş ve Al/NP/p-Si hibrit MIS yapısındaki arayüzey davranışı değerlendirilmiştir. FTIR analizleri, pektinin α -(1→4)-D-galakturonan omurgasını, belirgin –OH ve –COO⁻ fonksiyonel gruplarını ve kısmi esterleşme karakterini doğrulamıştır. EDX sonuçları, baskın C ve O içeriğine ek olarak önemli miktarda Na varlığını ortaya koyarak polianyonik yapıyı desteklemiştir. SEM görüntüleri amorf, tabakalı ve heterojen bir morfoloji gösterirken, DLS ölçümleri 32–258 nm aralığında çift modlu dağılım ve ortalama 109 nm hidrodinamik boyut sergilemiştir. Zeta potansiyelinin –18.1 mV olması, negatif yüzey yükünü ve kolloidal kararlılığı doğrulamaktadır. UV–Vis analizleri, nano pektinin geniş bant aralıklı ve optik olarak şeffaf bir biyopolimer olduğunu göstermiştir. Al/NP/p-Si yapısında elde edilen frekans bağımlı C–V ve G/–V karakteristikleri, belirgin arayüzey durum yoğunluğu, Maxwell–Wagner tipi ara yüzey polarizasyonu ve dipolar relaksasyon süreçlerine işaret etmektedir. Işık altında gözlenen kapasitans artışı, hump oluşumu ve tükenim bölgesi kaymaları, foto-indüklenmiş arayüzey yük modülasyonu ile ilişkilendirilmiştir. Elde edilen bulgular, nano pektinin yalnızca bir biyopolimer değil; yük depolama, foto-duyarlı dielektrik ve sensör arayüzeyi olarak kullanılabilecek fonksiyonel bir organik-dielektrik malzeme olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler : Nano pektin; MIS yapısı; Foto-duyarlı arayüzey.

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM VE SATHİ KAPLAMANIN FAYDA–MALİYET ANALİZLERİYLE ÖRNEK BİR YOL KESİMİ ÜZERİNDEN KARŞILAŞTIRILMASI

SUDE ÖZALTIN

İstanbul Nişantaşı Üniversitesi,
sudeozaltin@outlook.com - 0009-0002-6276-9555

Dr. Öğr. Üyesi GÖZDE SEZGİN TUNÇAY

İstanbul Nişantaşı Üniversitesi,
gozdesezgin.tuncay@nisantasi.edu.tr - 0009-0007-5305-8918

ÖZET

Karayolu üstyapıları, hizmet ömrü, sürüş güvenliği, kullanıcı konforu ve bakım maliyetleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle kırsal yol ağlarında sınırlı bütçeler ve görece düşük trafik hacimleri, kaplama türü seçiminde teknik performansın yanı sıra ekonomik sürdürülebilirliğin de dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, Yunak–Piribeyli yolu örneği üzerinden sathi kaplama ve bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama alternatifleri başlangıç yatırım maliyeti, iklimsel değerlendirmeler, sürüş konforu, hizmet ömrü, trafik hacmi ve yapısal performans açısından karşılaştırılmıştır. Maliyet analizinde yol geometrisi sabit tutulmuş; yalnızca kaplama türüne bağlı üstyapı tabakaları, malzeme miktarları ve birim maliyetler dikkate alınmıştır. Aynı zamanda yol kesiminin bulunduğu iklimsel koşullar ile yıllık ortalama günlük trafik (YOGT) verileri, kaplama performansı ve maliyet hesaplarına girdi olarak kullanılmıştır.

Mevcut durumda sathi kaplama bulunan yol için yapılan maliyet analizleri, bu kaplama türünün düşük ilk yatırım maliyeti sunduğunu ancak hizmet ömrü, sürüş konforu ve bölgenin iklim koşullarına karşı bozulma direnci açısından sınırlı performans sağladığını göstermiştir. BSK kaplama senaryosu ise MNPAVE yazılımı kullanılarak yapısal performans açısından değerlendirilmiş ve tekerlek izi oluşumunun yaklaşık bir yıl, yorulma çatlağı açısından ise yaklaşık on iki yıl içinde kritik seviyelere ulaşabileceği belirlenmiştir. Bulgular, Yunak-Piribeyli yolu kapsamında, BSK kaplamanın yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen mevcut trafik ve zemin koşulları altında beklenen performansı sürdürülebilir biçimde sağlayamadığını ve tasarım ömrü boyunca bakım ve rehabilitasyon gereksiniminin kaçınılmaz olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle kaplama türü seçiminin yalnızca ilk yatırım maliyetine değil, performans ve yaşam döngüsü maliyetlerine dayalı bütüncül bir değerlendirme ile yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Karayolu, Sathi Kaplama, Bitümlü Sıcak Karışım, Fayda–Maliyet Analizi, Yapısal Performans

1975 ÖNCESİ İNŞA EDİLEN BETONARME BİR YAPININ FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Prof. Dr. Ercan IŞIK

Bitlis Eren Üniversitesi,

eisik@beu.edu.tr - 0000-0001-8057-065X

Doç. Dr. Fatih AVCİL

Bitlis Eren Üniversitesi,

favcil@beu.edu.tr - 0000-0001-6550-550X

Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAC

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,

absarac@comu.edu.tr -0000-0002-4279-4158

ÖZET

06 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen ve asrın felaketi olarak adlandırılan depremler, 11 ilde farklı taşıyıcı sistemlere sahip çok sayıda yapıda tam göçme ya da değişen derecelerde yapısal hasar meydana getirmiştir. Yapısal yıkım ve hasarlarda, 2000 yılı öncesi inşa edilen yapılar ön plana çıkmıştır. Yapım yılının etkisini göstermek adına bu çalışma kapsamında, 1975 yılından önce güncel olarak kullanılan ve geçerli olan 1968-Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'teki minimum taşıyıcı eleman boyutları dikkate alınarak 5 katlı betonarme bir yapı modeli oluşturulmuş ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonucunda, kesme kuvvet kapasitesi aşılacak kolonlara lifli polimer (FRP) uygulaması yapılarak, güçlendirilmiş yapı için sayısal analizler tekrarlanmıştır. Güçlendirilen yapıda kesme kuvvet aşımı meydana gelmemiştir. Bu da özellikle eski mevcut yapı stokunda uygun güçlendirme uygulamalarının taşıyıcı sistemin sismik performansına katkısını bir kez daha ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Kahramanmaraş, FRP, betonarme, güçlendirme

1. GİRİŞ

06 Şubat 2023 tarihinde, yerel saatle 04:17 ve 13:24'te merkez üsleri Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçeleri olan, birbirinden farklı iki büyük deprem meydana gelmiştir. Literatürde "asrın felaketi" olarak nitelendirilen bu sismik olaylar, modern aletsel dönemde kaydedilen en yüksek can ve mal kayıplarına yol açan afetler olarak tarihe geçmiştir. Geniş bir coğrafi alana yayılan ve 11 ili doğrudan etkileyen bu depremler neticesinde; betonarme, yığma ve çelik gibi farklı taşıyıcı sistemlere sahip çok sayıda yapıda toptan göçme, ağır hasar ve çeşitli düzeylerde yapısal deformasyonlar gözlemlenmiştir. Söz konusu deprem serisini emsallerinden ayıran en temel özellikler; episantrların (merkez üslerinin) farklı lokasyonlarda fakat aynı bölge içerisinde olması, sarsıntıların kısa zaman aralıklarıyla tekrarlaması ve etkilediği bölgenin büyüklüğüdür. Bu faktörler, yapı stokundaki tahribatın şiddetini artırırken, arama-kurtarma ve lojistik süreçlerini de zorlaştırmıştır. Depremlerin yarattığı doğrudan fiziksel yıkımın yanı sıra; üretim hatlarının durması, altyapı tahribatı ve iş gücü kaybı gibi faktörler neticesinde ortaya çıkan makroekonomik ve ikincil dolaylı kayıplar da telafisi güç boyutlara ulaşmıştır [1,2,3,4,5,6].

Bu depremler, hakim kentsel yapı stoku olan betonarme yapılarda da çok büyük yıkım ve hasarlara neden olmuştur. Özellikle binaların yapım yılları hasarlarda kritik bir rol oynamıştır. Özellikle 2000 yılı önce inşa edilen yapılardaki yıkım ve hasar oranları daha fazla olmuştur [7,8,9]. Bu yıkımda yapısal düzensizlikler, depreme dayanıklı yapı tasarım ilkelerinin eksik, hatalı ve hiç uygulanmaması, düşük malzeme dayanımı, özellikle 2000 yılı öncesi yapı denetim sisteminin olmaması gibi faktörler kritik bir rol oynamıştır [10,11]. Özellikle eski deprem yönetmeliklerinde öngörülen düşük malzeme dayanımlarına göre inşa edilen yapılarda hasar düzeyi artış göstermiştir. Tüm bu sonuçlar mevcut yapı stokundaki 2000 yılı önce edilmiş yapılar ile ilgili alınacak kararların stratejik bir öneme sahip olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bu yapılar ile ilgili detaylı deprem performans analizlerinden sonra güçlendirme ve yıkım kararlarının alınması olası bir deprem öncesi alınabilecek önlemlerin başında gelecektir. Güçlendirme ile yapıların deprem performans düzeyleri öngörülen düzeye çekilerek olası yapısal hasarlarının önüne geçilmesi ve can kayıplarının minimize edilmesi sağlanabilir. Betonarme yapılarda farklı güçlendirme teknikleri kullanılabilmektedir. Bu yöntemlerden biri de taşıyıcı elemanlara lifli polimerlerin uygulanmasıdır.

Betonarme yapıların sismik performansını artırmak amacıyla uygulanan lifli polimer (FRP) kompozit sistemleri, yapı elemanlarının mekanik özelliklerini iyileştiren yüksek dayanımlı ve düşük ağırlıklı bir güçlendirme metodudur. Bu yöntemin temel amacı; özellikle süneklik kapasitesi yetersiz, korozyona uğramış veya tasarım yüklerinin ötesinde zorlanmaya maruz kalan yapısal elemanların moment, kesme ve eksenel yük taşıma kapasitelerini artırmaktır. Taşıyıcı sisteme katkısı bakımından lifli polimerler; kolonlarda oluşturdukları sargılama etkisiyle betonun basınç dayanımını ve şekil değiştirme kapasitesini belirgin şekilde yükseltirken, kiriş ve döşemelerde eğilme dayanımını takviye eder; ayrıca birleşim bölgelerinde gevrek kırılma modlarını engelleyerek yapının deprem enerjisini sönmüleme yeteneğini optimize eder. Korozyona karşı yüksek direnç göstermesi ve uygulama sırasında yapının kullanımını minimum düzeyde kısıtlaması, bu teknolojiyi modern mühendislik

uygulamalarında kritik bir rehabilitasyon stratejisi haline getirmektedir [12,13,14,15,6,17,18,19,20].

Bu çalışma kapsamında 2000 yılı öncesi yapıları temsil etmesi adına 1975 yılı öncesi yürürlükte olan 1968 deprem yönetmeliğindeki minimum malzeme dayanımları ile kolon ve kiriş en kesit koşulları dikkate alınarak 5 katlı betonarme bir yapı oluşturulmuştur. Statik itme analizi ile gerçekleştirilen yapısal analizlerden sonra kesme kuvvet kapasitesi aşılacak kolonlar tespit edilmiştir. Aşım olan kolonlarda FRP uygulaması ile güçlendirme uygulaması gerçekleştirilerek sayısal analizler yenilenmiştir. Güçlendirme öncesi ve sonrası özellikle kesme kuvvet kapasitesi aşımının olup olmadığı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlanarak, öneriler yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

İnşaat teknolojisindeki ilerlemelere paralel olarak, sismik aktivitelerin yol açtığı kayıpları asgari düzeye indirmek amacıyla yapı tasarım ve uygulama standartları geliştirilmiş; bu normlar yönetmelikler aracılığıyla yasal bir statü kazanmıştır. Türkiye’de depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkeleri, tarihsel süreçte afet yönetmelikleri kapsamında düzenlenmiş olup, günümüze kadar on farklı revizyon aşamasından geçmiştir. Yürürlükte oldukları dönemlerde meydana gelen yıkıcı depremler, mevcut yönetmeliklerin performansını test etmiş ve ortaya çıkan yetersizlikler, bu metinlerin teknik tecrübeler ışığında sürekli olarak güncellenmesini veya yeniden kaleme alınmasını zorunlu kılmıştır. Gelişen mühendislik biliminin ve saha deneyimlerinin bir sonucu olarak modernizasyon sürecine tabi tutulan bu düzenlemeler, odağı her zaman deprem güvenliği olduğu için literatürde ve uygulamada "deprem yönetmelikleri" olarak adlandırılmaktadır [21,22]. Türkiye’de yürürlüğe girmiş olan deprem yönetmelikleri;

- ❖ 1940 – Zelzele Mıntıkalarında Yapılacak İnşaata Ait İtalyan Yapı Talimatnamesi
- ❖ 1944 – Zelzele Mıntıkalarında Muvakkat Yapı Talimatnamesi
- ❖ 1949 – Türkiye Yer Sarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği
- ❖ 1953 – Yersarsıntısı Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
- ❖ 1962 – Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
- ❖ 1968 – Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
- ❖ 1975 – Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
- ❖ 1998 - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
- ❖ 2007 – Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
- ❖ 2018 – Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

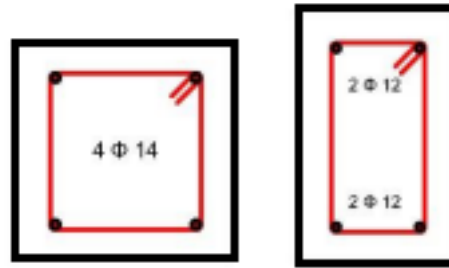
Bu çalışma kapsamında ABYYHY-1968’te öngörülen ve Çizelge 1’de gösterilen minimum kolon-kiriş en kesit koşulları ile malzeme sınıfları dikkate alınarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Dikkate alınan en kesit ve malzeme koşulları

Parametre	ABYYHY-1968
Beton	C12

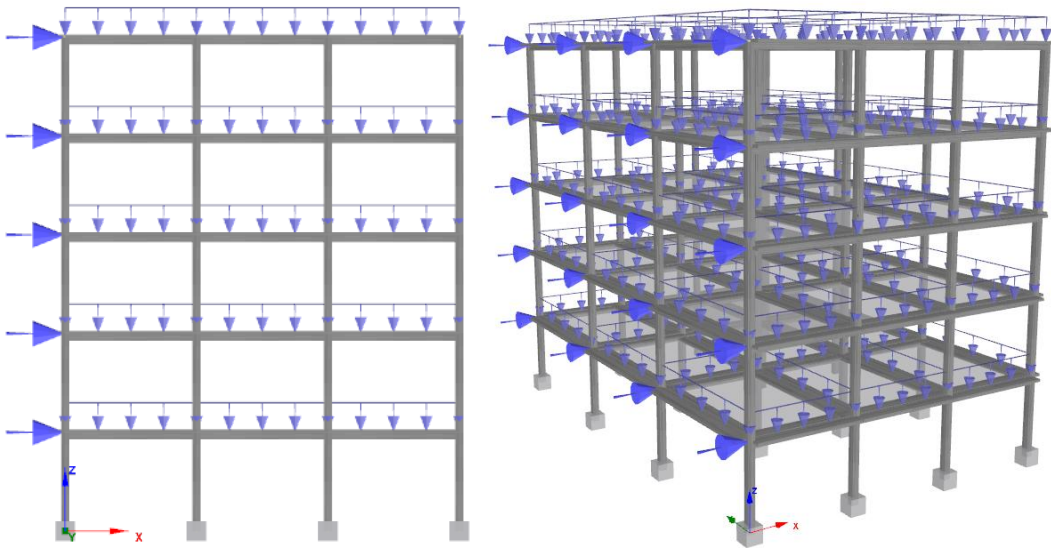
Donatı	S220
Kolonlar (mm)	250*250
Kirişler (mm)	150*300
Kiriş alt donatı	2Φ12
Kiriş üst donatı	2Φ12
Kolon boyuna donatı	4Φ14
Enine donatı	Φ6/250

Kolon ve kirişlere ait minimum koşullar dikkate alınarak oluşturulan kolon ve kiriş en kesitleri Görsel 1’de gösterilmiştir.



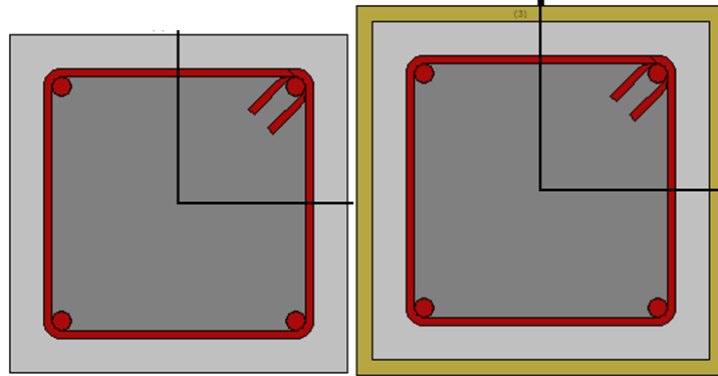
Görsel 1. Çalışmada dikkate alınan kolon ve kiriş en kesitleri

Bu çalışma kapsamında, orta yükseklikteki betonarme binaları temsil etmek adına 5 katlı betonarme bir yapı örneği dikkate alınmıştır. Malzeme olarak C12-S220 seçimi yapılan bina modelinde her bir kat yüksekliği 3m olarak dikkate alınmıştır. Yapıda herhangi bir düzensizlik bulunmamaktadır. Yapısal analizler Seismostruct [23] yazılımında yer alan statik itme analizi kullanılmıştır. Dikkate alınan yapısal model için elde edilen 2 ve 3 boyutlu modeller Görsel 2’de gösterilmiştir.



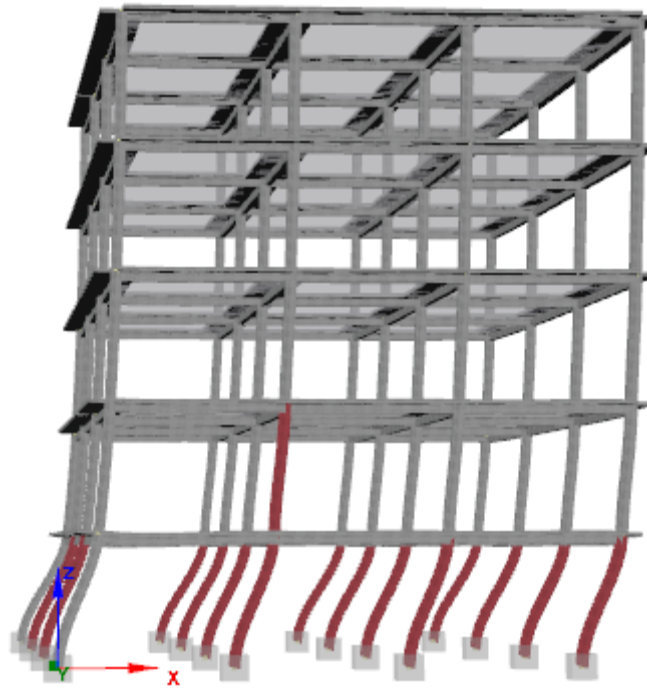
Görsel 2. Örnek BA yapı için 2 ve 3 boyutlu modeller

Bu çalışmada güçlendirme uygulamaları sadece kolonlara uygulanmıştır. Kolonlarda güçlendirme öncesi ve sonrası elde edilen kolon en kesitleri Görsel 3’te gösterilmiştir.



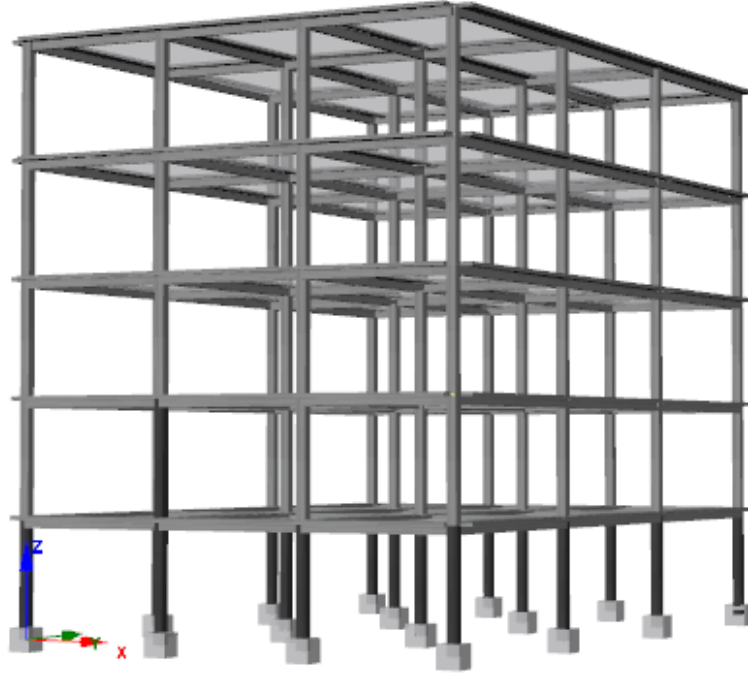
Görsel 3. Güçlendirme öncesi ve sonrası için kolon en kesitleri

Referans bina olarak modellenen ve ABYYHY-1968'deki minimum en kesit ve malzeme koşullara sahip 5 katlı betonarme yapı için elde edilen kesme kuvvet hasar durumu Görsel 4'te gösterilmiştir.



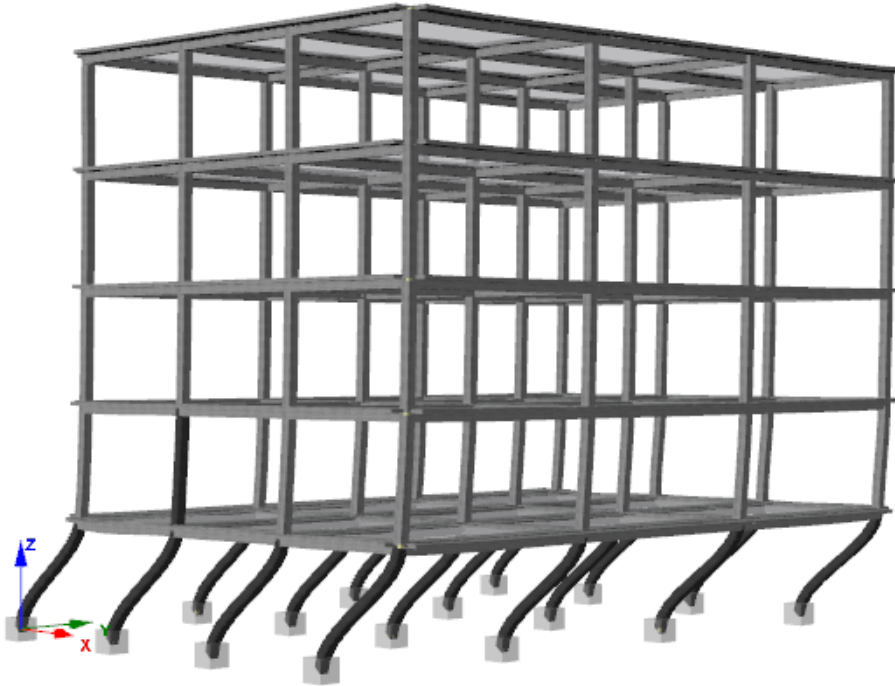
Görsel 4. Referans bina modeli için kesme kuvvet hasar durumu

Görsel 4'ten görüleceği üzere minimum koşullar dikkate alınarak herhangi bir yapısal düzensizlik içermeyen oluşturan referans binada kesme kuvvet kapasitesi aşılacak bir çok kolon bulunmaktadır. Sadece kesme kuvvet kapasitesi aşılacak kolonlara FRP uygulaması yapılarak elde edilen üç boyutlu yapısal model Görsel 5'te gösterilmiştir. Siyah renkli kolonlara FRP uygulaması yapılmıştır.



Görsel 5. Güçlendirilen kolonlar için elde edilen üç boyutlu model

Güçlendirme sonrası elde edilen kesme kuvvet kapasitesi için elde edilen deformasyon durumu Görsel 6’da gösterilmiştir.



Görsel 6. Önerilen güçlendirme sonrası elde edilen kesme kuvvet için deformasyon durumu

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, 1975 yılı öncesi inşa edilen betonarme yapı stokunu temsil etmek üzere, 1968 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik’te [24]

öngörülen minimum malzeme dayanımları ve kesit koşulları dikkate alınarak modellenen 5 katlı betonarme bir yapının sismik performansı incelenmiştir. Statik itme analizi sonuçları, herhangi bir plan veya düşey düzensizlik içermemesine rağmen referans yapıda çok sayıda kolonda kesme kuvvet kapasitesinin aşıldığını ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle 2000 yılı öncesi betonarme yapılarda sıklıkla karşılaşılan yetersiz enine donatı düzeni, düşük beton dayanımı ve süneklik eksikliği gibi yapısal zafiyetlerin, göçme mekanizmasını hızlandıran kritik unsurlar olduğunu açıkça göstermektedir. Elde edilen bulgular, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde ağır hasar veya göçme yaşayan benzer yapı tipleriyle uyumlu sonuçlar sunmaktadır.

Kesme kuvvet kapasitesi yetersiz olan kolonlara lifli polimer (FRP) ile yapılan güçlendirme uygulaması sonrasında gerçekleştirilen sayısal analizler, güçlendirme müdahalesinin yapısal performans üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymuştur. FRP ile sarılan kolonlarda kesme kuvvet kapasitesinin aşıldığı herhangi bir duruma rastlanmamış, böylece gevrek kesme hasarlarının önüne geçilmiştir. Bu sonuç, FRP uygulamasının kolonlarda sargılama etkisi oluşturarak hem betonun basınç dayanımını hem de şekil değiştirme kapasitesini artırdığını; aynı zamanda kolon davranışını daha sünek bir mekanizmaya yönlendirdiğini göstermektedir. Güçlendirme sonrası elde edilen performans artışı, FRP'nin özellikle mevcut yapı stokunda hızlı, etkin ve müdahale seviyesi düşük bir güçlendirme yöntemi olarak uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, 1975 yılı öncesi betonarme yapılarda yalnızca yönetmeliklere uygun minimum kesit ve malzeme koşullarının sağlanmasının, güvenli bir deprem performansı için yeterli olmadığını; buna karşın, hedeflenen taşıyıcı elemanlara yönelik uygun FRP güçlendirme uygulamalarının yapının sismik davranışını anlamlı ölçüde iyileştirebildiğini ortaya koymuştur. Özellikle kesme hasarlarının önlenmesi açısından FRP ile kolon güçlendirmesinin, yıkım riskinin azaltılmasında kritik bir rol üstlendiği görülmektedir. Bu bağlamda, benzer özelliklere sahip mevcut yapıların detaylı performans analizleriyle değerlendirilmesi ve güçlendirme kararlarının eleman bazında verilmesi, olası depremler öncesinde can ve mal kayıplarının azaltılmasına yönelik etkili bir strateji olarak önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Bayraktar, A., Bayraktar, S., Núñez, T. R., Brzev, S., Ventura, C. E., Yang, T. Y., & Taş, Y. Seismic demand and performance for severely damaged low-rise buildings during the February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 203, 109999, 2026.
- [2] Aydın, M. C., Işık, E., Büyüksaraç, A., Ulu, A. E., & Avcil, F. Technical and socio-economic perspective on the disaster of the century (6 February 2023 earthquake) in Türkiye on the second anniversary, *Geological Journal*, 2025.
- [3] Büyüksaraç, A., Işık, E., Bektaş, Ö., & Avcil, F. Achieving intensity distributions of 6 February 2023 Kahramanmaraş (Türkiye) earthquakes from peak ground acceleration records, *Sustainability*, 16(2), 599, 2024.
- [4] Bilim, F., Koşaroğlu, S., & Aydemir, A. Relationship between crustal magnetic anomalies and earthquake activity in Malatya and surrounding region after the 2023

- Kahramanmaraş earthquakes, southeastern Türkiye, *Acta Geophysica*, 74(1), 48, 2026.
- [5] İnce, E. G., Çakıl, B., Şimşek, M., & İnce, O. Evaluation of ground motions and seismic performance of RC buildings after 2023 Kahramanmaraş earthquakes: design and construction deficiencies, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-28, 2025.
- [6] İnce, E. G. Seismic performance of RC buildings with one-way joist slab: Insights from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structural Concrete*, 2025.
- [7] Aras, F., Doğan, T. P., Öztürk, M., Tün, M., Işık, E., & Arslan, M. H. Assessment of the damage caused by the 6 February 2023 earthquakes on old and new dated reinforced concrete buildings in Elbistan, Turkey, *Advances in Structural Engineering*, 13694332251375194, 2025.
- [8] Peker, F. Ü., Yuzbasi, J., Işık, E., Büyüksaraç, A., & Avcil, F. Damage assessment, regional ground motion record evaluation, and seismic performance analysis of a high-rise 14-story dual system building after the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structures*, 80, 109897, 2025.
- [9] Işık, E., Shao, Y. B., Hadzima-Nyarko, M., Radu, D., Bulajić, B., & Lozančić, S. Enhancing the seismic safety of upgraded RC buildings using FRP retrofitting: analytical and field evidence from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-35, 2025.
- [10] Eren, M. E., & Fenerli, C. Seismic failure mechanism shift in RC buildings revealed by NDT-supported, field-calibrated BIM-based models, *Applied Sciences*, 16(1), 455, 2026.
- [11] Işık, E. Parameters in the rapid evaluation method in reinforced-concrete structures in the light of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Earthquakes and Structures*, 29(4), 269, 2025.
- [12] Işık, E., Radu, D., Harirchian, E., Avcil, F., Arkan, E., Büyüksaraç, A., & Hadzima-Nyarko, M. Failures in reinforced-concrete columns and proposals for reinforcement solutions: Insights from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Buildings*, 15(9), 1535, 2025.
- [13] Işık, E. A study on strengthening RC structural elements with fiber-based polymers, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 1269-1286, 2025.
- [14] Işık, E., Hadzima-Nyarko, M., Tayeh, B. A., Harrat, Z. R., Avcil, F., & Arkan, E. Comparison of reinforcement methods with advanced materials for RC columns, *Advanced Engineering Letters*, 4(1), 1-13, 2025.
- [15] Abdoli, M., & Mostofinejad, D. Shear-torsion interaction in FRP-strengthened RC members: Modeling, failure modes, and experimental correlation, *Construction and Building Materials*, 500, 144138, 2025.
- [16] Liu, Y., Hao, Y., Hao, H., & Zhou, Y. Fragility assessment of FRP-strengthened RC beams with chloride-induced corrosion damage under impact loads, *Reliability Engineering & System Safety*, 111728, 2025.
- [17] Zhang, S. S., Zhang, D. D., & Nie, X. F. Behavior of RC interior beam-to-column joints with FRP-strengthened beam web openings under cyclic loading, *Engineering Structures*, 324, 119373, 2025.
- [18] Dirar, S., Sogut, K., Caro, M., Rahman, R., Theofanous, M., & Faramarzi, A. Effect of shear span-to-effective depth ratio and FRP material type on the behaviour of RC T-beams strengthened in shear with embedded FRP bars, *Engineering Structures*, 332, 120105, 2025.

- [19] Sun, P. X., Bai, Y. L., & Peng, K. D. Behavior and analytical modelling of slender RC columns strengthened by LRS FRP under eccentric compression, *Journal of Building Engineering*, 114057, 2025.
- [20] Huang, C., Zhang, R., Zhang, J., Guo, X., Wei, P., Wang, L., & Wang, Y. A novel method for fatigue design of FRP-strengthened RC beams based on machine learning, *Composite Structures*, 359, 118867, 2025.
- [21] Alyamaç, K. E., & Erdoğan, A. S. Geçmişten günümüze afet yönetmelikleri ve uygulamada karşılaşılan tasarım hataları, *Deprem Sempozyumu, Kocaeli*, 707-715, 2005.
- [22] Işık, E. A comparative study on the structural performance of an RC building based on updated seismic design codes: Case of Turkey, *Challenge*, 7, 123-134, 2021.
- [23] Seismosoft. SeismoStruct 2025—A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, 2025. <http://www.seismosoft.com>
- [24] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1968), Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 1968.

**06 ŞUBAT 2023 DEPREMLERİNİN ARDINDAN MALATYA'DAKİ BETONARME
YAPILARIN YAPISAL DÜZENSİZLİKLER AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Fatih AVCİL

Bitlis Eren Üniversitesi,

favcil@beu.edu.tr - 0000-0001-6550-550X

Prof. Dr. Ercan IŞIK

Bitlis Eren Üniversitesi,

eisik@beu.edu.tr - 0000-0001-8057-065X

Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAC

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,

absarac@comu.edu.tr -0000-0002-4279-4158

ÖZET

Bu çalışma, betonarme taşıyıcı sistemlerde projelendirme ve uygulama safhalarındaki teknik eksikliklerin, yapısal kapasite üzerindeki yıkıcı etkilerini 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri özelinde irdelemektedir. Depreme dayanıklı tasarım ilkelerine uyulmaması, yapısal düzensizlikler, zayıf yerel zemin koşulları ve sismik yüklerin şiddeti gibi faktörlerin eş zamanlı etkileşimi, binalarda öngörülen taşıma limitlerinin aşılmasına ve neticesinde toptan, kısmi veya progresif göçmelere yol açmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Malatya ilinde söz konusu depremlerde ağır hasar almış veya tamamen yıkılmış on iki adet betonarme yapı seçilerek vaka analizi yöntemiyle incelenmiştir. Yapıların deprem öncesi durumları ile deprem sonrası görselleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Göçme veya hasar mekanizmalarını tetikleyen temel mühendislik hataları ve hasar gerekçeleri analitik bir yaklaşımla ortaya konulmuştur. Bu ampirik değerlendirme, mevcut yapı stokundaki kronik zafiyetlerin teşhis edilmesi ve gelecekteki sismik risklerin yönetilmesi açısından kritik veriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Göçme, Betonarme, Deprem, Düzensizlik, Malatya

1. GİRİŞ

Depremlerin arından meydana gelen yıkım ve farklı düzeylerdeki yapısal hasarlar, mevcut yapıların deprem performanslarının belirlenerek, yetersiz deprem performansına sahip yapılar ile ilgili gerekli kararların verilmesi, depreme dirençli kentlerin oluşmasında kritik bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Bu süreç, kentsel planlama ve sosyal hayatın sürdürülebilirliği açısından, modern afet yönetiminin mevcut yapılar ile ilgili alınabilecek önlemlerin ayrılmaz bir parçasıdır. Kentsel yapı stokunun temel bileşeni olan betonarme yapıların sismik karakteristikleri, zemin-yapı etkileşimi ve sismik aktivitenin büyüklüğü, meydana gelebilecek hasar spektrumunu belirleyen temel parametrelerdir. Nüfus yoğunluğunun büyük bir kısmını barındıran bu yapıların dinamik yükler altındaki yapısal davranışı, can güvenliğinin tesisi ve yapısal bütünlüğün korunması noktasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, binaların deprem dirençli tasarım normlarına uygun olarak projelendirilmesi ve inşa edilmesi, sismik performans seviyelerini doğrudan tayin etmektedir. Mevcut bilimsel ve teknolojik imkanlarla oluşma zamanı kestirilemeyen depremlerin yıkıcı etkilerini minimize edebilmek için, afet öncesi risk yönetimi ile afet sonrası iyileştirme süreçlerinin koordineli bir şekilde yürütülmesi bir gerekliliktir. Özellikle saha gözlemleri ve hasar tespit çalışmaları sonucunda elde edilen veriler; sismik risk modellerinin kalibre edilmesine, deprem tehlike haritalarının güncellenmesine ve yürürlükteki yapı yönetmeliklerinin ampirik bulgular ışığında daha güvenli hale getirilmesine temel teşkil etmektedir.

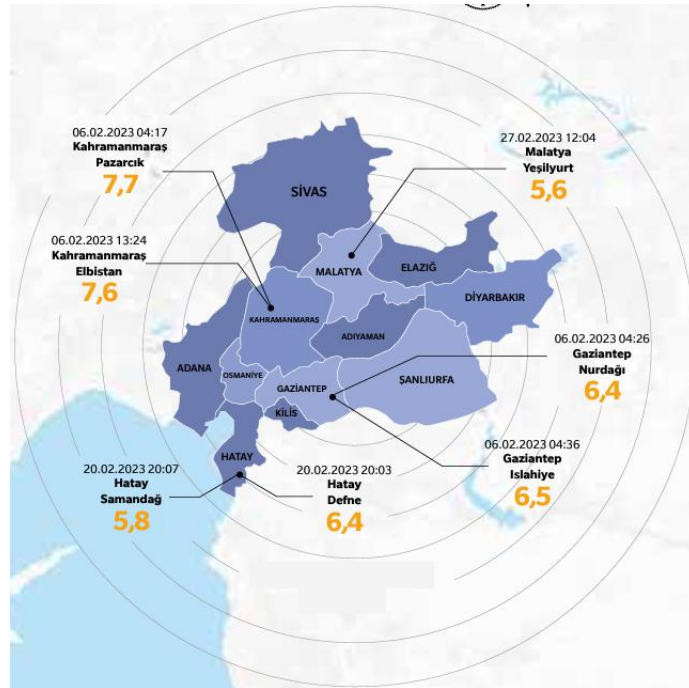
06 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli sismik olaylar, 11 ilde geniş çaplı bir yıkıma yol açarak yüz binlerce yapının işlevsiz hale gelmesine neden olmuştur. Bölgedeki kentsel dokunun ana gövdesini oluşturan betonarme sistemler, ağır yapısal deformasyonların yanı sıra yaygın olarak kısmi veya progresif göçme mekanizmalarına maruz kalmıştır. Deprem sonrası literatürde, bu hasar ve yıkımların nedenlerini araştıran çok sayıda bilimsel çalışma yayımlanmış; söz konusu araştırmalar, hasar oluşumlarını deprem ve inşaat mühendisliği prensipleri çerçevesinde analitik bir düzlemde irdemiştir. Yapılan bu akademik değerlendirmeler sonucunda; betonarme elemanlardaki yapısal konfigürasyon hataları, standart altı malzeme dayanımları, deprem dirençli tasarım normlarına uyulmaması, hatalı projelendirme yaklaşımları ve elverişsiz yerel zemin parametrelerinin, gözlemlenen tahribatın birincil katalizörleri olduğu saptanmıştır [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15]. Bu tür ve benzeri çalışmalar, yapıların hasar durumlarının bilimsel yöntemlerle değerlendirilmesini sağlayarak, mühendislik disiplininde yapı güvenliği, dayanıklılık analizi ve risk yönetimi konularında bilgi üretimine katkıda bulunmaktadır. Aynı zamanda, elde edilen veriler ve geliştirilen yöntemler, uygulamada yapı stokunun güvenli hale getirilmesi, can kayıplarının önlenmesi ve kaynakların etkin kullanımı açısından kritik rol oynayacaktır. Bu tür çalışmalar, afet sonrası iyileştirme ve yeniden yapılandırma süreçlerinin etkinliğini artırarak toplumsal dirençliliğin geliştirilmesine de doğrudan katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin önemli etkiler yaptığı ve çok yüksek sismik riskli bir konumda bulunan Malatya ilinde yer alan ve depremlerde hasar alan veya yıkıma uğrayan on iki farklı betonarme yapı dikkate alınmıştır.

On iki farklı betonarme yapı için hasar görselleri, saha gözlemleri sonucu elde edilmiştir. Coğrafi konumları belirlenen bu yapılar için, Google Street uygulaması yardımı ile deprem öncesi görseller elde edilmiştir. Tüm bu yapıların deprem öncesi ve görselleri karşılaştırılarak hasar nedenleri yapısal düzensizlikler açısından ortaya konmaya çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Türkiye, 06 Şubat 2023 tarihinde ardışık ve sismolojik olarak birbirinden farklı iki büyük depremin neticesinde geniş ölçekli bir yapısal yıkım süreciyle karşı karşıya kalmıştır. Söz konusu depremler; sarsıntı şiddeti, kapsadığı coğrafi bölge ve tarihsel tekerrür periyotları açısından dünya üzerindeki majör sismik olaylar kategorisinde değerlendirilmektedir. Modern aletsel gözlem döneminde kaydedilen en yüksek can kaybı oranlarına ulaşan bu silsile, ulusal literatürde "asrın felaketi" olarak kavramsallaştırılmıştır. Kronolojik olarak; ilk sarsıntı saat 04:17'de Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesi merkezli $M_w=7.7$ büyüklüğünde, ikinci sarsıntı ise aynı gün 13:24'te Elbistan odaklı $M_w= 7.6$ büyüklüğünde gerçekleşmiştir. 11 ili doğrudan ve yıkıcı bir biçimde etkileyen bu sismik hareket, komşu bölgelerde de yüksek ivmeli yer hareketleri şeklinde hissedilerek geniş bir etki alanında tahribata yol açmıştır. Depremler ve etkilediği bölge Görsel 1'de gösterilmiştir.



Görsel 1. Ana depremler ve etkilenen bölge (İletişim Başkanlığı, 2023)

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş'ta meydana gelen depremlerin ardından ilgili Bakanlık tarafından yapılan hasar tespit çalışmalarındaki illere göre hasar dağılımı konut bazında Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. İl bazında hasar tespit raporu (Konut sayısı) (6 Mart 2023)

İl	Toplam Acil + Ağır + Yıkık	%	Orta Hasarlı	%	Az Hasarlı	%
Adana	2952	0.6	11768	8.9	71072	5.55
Adıyaman	56256	10.9	18715	14.2	72729	5.68
Diyarbakır	8602	1.7	11209	8.5	113223	8.85
Elazığ	10156	2.0	1522	1.2	31151	2.43
Gaziantep	29155	5.6	20251	15.4	236497	18.48
Kahramanmaraş	99326	19.2	17887	13.6	161137	12.59
Malatya	71519	13.8	12801	9.7	107765	8.42
Hatay	215255	41.6	25957	19.7	189317	14.79
Kilis	2514	0.5	1303	1.0	27969	2.19
Osmaniye	16111	3.1	4122	3.1	69466	5.43
Şanlıurfa	6163	1.2	6041	4.6	199401	15.58
Bölge toplamı	518009	100.0	131576	100.0	1279727	100.00

Çizelge 1’den görüleceği üzere en büyük yapısal kayıplar Hatay, Kahramanmaraş, Adıyaman ve Malatya illerinde oluşmuştur. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan betonarme bina en fazla hasar oluşan dört ilden biri olan Malatya ilinde yer almaktadır. Farklı nedenlerden farklı düzeylerde hasar almış betonarme yapı örnekleri Görsel 2’de gösterilmiştir.



Görsel 2. BA yapılarda hasar örnekleri a) çarpışma hasarı; b) yumuşak kat hasarı; c) yetersiz betonarme; d) yetersiz betonarme; e) kısa kolon; f) dolgu duvar hasarları; g) kısa kiriş hasarı; h) yetersiz paspayı; i) yumuşak/zayıf kat

Bu çalışmada Malatya ilinde depremlerden farklı düzeyde etkilenen 12 adet betonarme yapı dikkate alınmıştır. Bu çalışma kapsamında Malatya ilinde dikkate alınan kısmi veya toptan göçmeye maruz kalmış on iki adet betonarme binanın deprem öncesi ve sonrası görselleri

Görsel 3’te gösterilmiştir. Deprem öncesi görseller Google Street uygulaması yardımı ile elde edilmiştir.

No
1

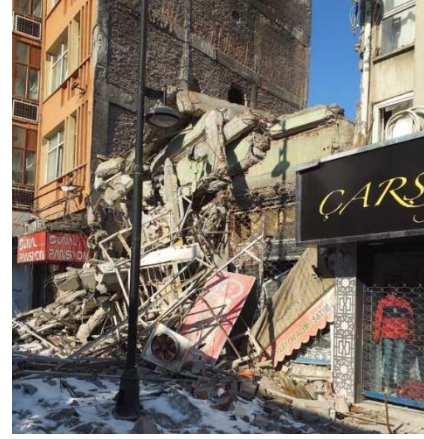
Deprem Öncesi (Google Street)



Deprem Sonrası



2



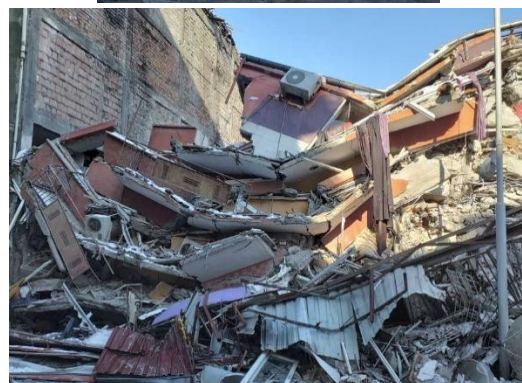
3



4



5



6



7



8



9



10



11



12



Görsel 3. İncelenen BA binaların deprem öncesi ve sonrası durumları

Bu çalışma kapsamında, Malatya ilinde depremlere maruz kalmış bu yapılarıdaki olumsuzluk parametrelerinin dağılımı Çizelge 2’ de yapılmıştır.

Çizelge 2. İncelenen yapılarda gözlemlenen düzensizlikler

Bina No	Yumuşak/Zayıf Kat	Kısa Kolon	Çarpışma Etkisi	Ağır Çıkma	Planda Düzensizlik
1	√	√	X	√	X
2	√	√	√	X	X
3	√	X	√	√	X
4	√	X	√	√	X
5	√	X	√	√	X
6	√	√	√	√	X
7	√	√	X	√	X
8	√	√	X	√	√
9	√	√	√	√	√
10	√	X	√	√	X
11	√	X	√	√	X

12	√	X	X	√	X

12 farklı binanın deprem riskini etkileyen yapısal düzensizliklerini (yumuşak kat, kısa kolon, çarpışma etkisi, ağır çıkma ve planda düzensizlik) karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Sunulan veriler ışığında 12 bina üzerinde yapılan yapısal düzensizlik analizi, incelenen yapı stokunun deprem güvenliği açısından ciddi riskler taşıdığını ve mühendislik açısından kritik kusurların yaygın olduğunu göstermektedir. İncelenen tüm binalarda (12/12) istisnasız görülen "Yumuşak/Zayıf Kat" düzensizliği, yapıların giriş katlarının üst katlara oranla daha düşük rijitliğe sahip olduğunu ve olası bir sarsıntıda ani çökme riskinin çok yüksek olduğunu kanıtlamaktadır; buna ek olarak binaların %92'sinde (11/12) bulunan "Ağır Çıkma" kusuru, yapısal kütle dağılımındaki dengesizliğin ve kolonlara binen ek yüklerin genel bir sorun haline geldiğini ortaya koymaktadır. Burada belirlenen yumuşak/zayıf kat görsele dayalı olarak göreceli olarak değerlendirilmiştir. Özellikle tüm risk faktörlerini (5/5) bünyesinde barındıran 9 numaralı bina ile dört farklı düzensizliğe sahip olan 8 numaralı bina, teknik açıdan en yüksek riskli yapılar olarak öne çıkarken, "Kısa Kolon" etkisinin binaların yarısından fazlasında görülmesi gevrek kırılma riskinin yaygınlığını teyit etmektedir. Sonuç olarak, binaların büyük bir kısmında birden fazla yapısal kusurun bir arada bulunması nedeniyle, bu yapıların mevcut halleriyle deprem yönetmeliği standartlarını karşılamaktan uzak olduğu görülmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan saha incelemeleri ve yapısal düzensizlik analizleri sonucunda, incelenen 12 binadan oluşan yapı stokunun deprem güvenliği açısından oldukça kırılgan bir tablo sergilediği görülmektedir. Özellikle tüm yapılarda tespit edilen 'Yumuşak Kat' düzensizliği ile binaların %92'sini etkileyen 'Ağır Çıkma' kusuru, bölgedeki yapı üretim sürecinde mimari estetik veya alan kazanımı kaygılarının, temel mühendislik ve can güvenliği prensiplerinin önüne geçtiğini kanıtlamaktadır. Bu bağlamda, yumuşak kat etkisini gidermek adına zemin katlarda betonarme perde duvar ilaveleri yapılması, kısa kolon etkisinin görüldüğü noktalarda kolonların tam boy kuşatılarak sünekliğinin artırılması ve çarpışma riski bulunan binalar arasında sönümleyici sistemlerin kullanılması öncelikli çözüm önerileri olarak sunulmaktadır. Nihai olarak, bu denli yoğun düzensizlik içeren yapıların yerel yönetimler tarafından 'öncelikli dönüşüm alanı' kapsamına alınması ve kapsamlı bir kentsel rehabilitasyon programının başlatılması, olası bir afet sonrasında yaşanacak can ve mal kayıplarını minimize etmek adına zorunlu bir adım olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- [25] Aras, F., Doğan, T. P., Öztürk, M., Tün, M., Işık, E., & Arslan, M. H. Assessment of the damage caused by the 6 February 2023 earthquakes on old and new dated reinforced concrete buildings in Elbistan, Turkey, *Advances in Structural Engineering*, 13694332251375194, 2025.
- [26] Atar, M., İnce, O., Taş, Ö. F., Özmen, A., & Sayın, E. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında betonarme kolonlarda enine donatı kusurlarının incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), 221-230, 2024.

- [27] Avgın, S., Köse, M. M., & Özbek, A. Damage assessment of structural and geotechnical damages in Kahramanmaraş during the February 6, 2023 earthquakes, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 57, 101811, 2024.
- [28] Dedeoglu, I. O., Yetkin, M., Tunc, G., & Ozbulut, O. E. Evaluating earthquake-induced damage in Doganşehir, Malatya after 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence: Geotechnical and structural perspectives, *Journal of Building Engineering*, 112266, 2025.
- [29] Dinçer, A. E., Dincer, N. N., Tekin-Koru, A., Yaşar, B., & Yılmaz, Z. The impact of Kahramanmaraş (2023) earthquakes: A comparative case study for Adıyaman and Malatya, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, 104647, 2024.
- [30] Işık, E., Shao, Y. B., Hadzima-Nyarko, M., Radu, D., Bulajic, B., & Lozancic, S. Enhancing the seismic safety of upgraded RC buildings using FRP retrofitting: analytical and field evidence from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-35, 2025.
- [31] Işık, E., & Hamamcıoğlu, M. Risk prioritization of RC buildings in Bitlis (Türkiye) in the light of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Buildings*, 15(19), 3552, 2025.
- [32] İnce, E. G. Seismic performance of RC buildings with one-way joist slab: Insights from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structural Concrete*, 2025.
- [33] İnce, E. G., Çakıl, B., Şimşek, M., & İnce, O. Evaluation of ground motions and seismic performance of RC buildings after 2023 Kahramanmaraş earthquakes: design and construction deficiencies, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-28, 2025.
- [34] Onat, O., Yön, B., Uslu, A., Öncü, M. E., Varolgüneş, S., Karaşin, İ. B., & Gör, M. Seismic resistance and performance evaluation of masonry dwellings after the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquake sequence in Türkiye, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 18(04), 2450013, 2024.
- [35] Özmen, A., İnce, O., Taş, Ö. F., Atar, M., Ozbulut, O. E., & Sayın, E. Seismic performance assessment of structures in Malatya Province after 6 February 2023 Turkey earthquake sequences, *Natural Hazards*, 121(5), 5293-5326, 2025.
- [36] Peker, F. Ü., Yuzbasi, J., Işık, E., Büyüksaraç, A., & Avcil, F. Damage assessment, regional ground motion record evaluation, and seismic performance analysis of a high-rise 14-story dual system building after the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structures*, 80, 109897, 2025.
- [37] Turan, A. I., Celik, A., Kumbasaroglu, A., & Yalciner, H. Assessment of reinforced concrete building damages following the Kahramanmaraş earthquakes in Malatya, Turkey (February 6, 2023), *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 54, 101718, 2024.
- [38] Yıldız, Ö., & Kına, C. Geotechnical and structural investigations in Malatya province after Kahramanmaraş Earthquake on February 6, 2023, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 686-703, 2023.
- [39] Yuzbasi, J. Post-earthquake damage assessment: field observations and recent developments with recommendations from the Kahramanmaraş earthquakes in Türkiye on February 6th, 2023 (Pazarcık M7.8 and Elbistan M7.6), *Journal of Earthquake Engineering*, 29(16), 3367-3392, 2025.

**FARKLI İŞLEMLER GÖRDÜKTEN SONRA YÜZEYLERİNE TEK VE ÇİFT
KOMPONENTLİ PARKE VERNİKLERİ UYGULANMIŞ ADI DIŞBUDAK
ODUNUNDA EV İÇİ KİMYASALINA MARUZ KALMANIN RENK
PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

Mete AKTER

Dual, Beylikdüzü, İstanbul, Türkiye

meteakter@hotmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9933-9711

Doç. Dr. Ümit AYATA

*Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü,
Bayburt, Türkiye

*Sorumlu yazar: umitayata@yandex.com, ORCID ID: 0000-0002-6787-7822

Özet

Bu çalışmada, farklı işlemler (212°C’de 2 saat ısıtma işlem ve 2 farklı ağartma uygulamaları: oksalik asit: $C_2H_2O_4$ ve hidrojen peroksit: H_2O_2 + sodyum hidroksit: NaOH) gördükten sonra yüzeylerine tek ve çift komponentli parke vernikleri uygulanmış adi dışbudak (*Fraxinus excelsior*) odununu yüzeylerinin ev içi kimyasalından birisi olan beyaz sirkeye 18 saat süre ile maruz kalması sonrasında renk parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir. 12 farklı deney grubu örneği oluşturulmuştur. Tek ve çift komponentli parke vernikleri endüstriyel uygulamalara göre fırça yardımı ile uygulanmıştır. Sonuçlara göre farklı verilerde ΔE^* değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan beyaz sirke bütün tek ve çift komponentli parke vernikleri ile kaplanmış ahşap yüzeyler üzerinde renk parametrelerini değiştirdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: adi dışbudak, ısıtma işlem, ağartma, parke verniği, renk parametreleri

**Effects of Exposure to Household Chemicals on Color Parameters of Common Ash
Wood After Different Treatments and Application of Single and Two-Component
Parquet Varnishes**

Abstract

In this study, the effects of exposure to white vinegar, a household chemical, for 18 h on the color parameters of common ash (*Fraxinus excelsior*) wood, which had undergone different treatments (2 h of heat treatment at 212°C and 2 different bleaching applications: oxalic acid: $C_2H_2O_4$ and hydrogen peroxide: H_2O_2 + sodium hydroxide: NaOH) and then had single and two-component parquet varnishes applied to its surface, were investigated. Twelve different experimental groups were created. Single and two-component parquet varnishes were applied using a brush, according to industrial application methods. ΔE^* values were calculated for different data points based on the results. In the study, white vinegar was found to alter the color parameters on all single and two-component parquet varnished wood surfaces.

Keywords: Common ash, heat treatment, bleaching, parquet varnish, color parameters

1. Giriş

Eski çağlardan beri insanlar, ağaç kaynaklarının bulunduğu yerlerde yapı malzemesi olarak her zaman ahşabı tercih etmişlerdir. Bunun nedeni, üstün mukavemet-ağırlık oranı, hafiflik, ısı yalıtımı, işlenebilirlik ve daha iyi deprem performansı gibi doğal avantajlarıdır. Günümüzde insanlar çevre dostu ve sürdürülebilir kalkınma modeline büyük önem vermektedir. Yeşil ve yenilenebilir bir yapı malzemesi olarak ahşap, günümüz inşaat mühendisliğinde hala yaygın olarak kullanılmaktadır (Fu ve ark., 2019).

Çevre dostu bir modifikasyon yöntemi olarak ısıl işlem, ağaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl işlemin temel prensibi, özellikle düşük molekül ağırlıklı hemiselülozlar olmak üzere, ağaç hücre duvarı maddesinin termal bozunması ve moleküler yeniden yapılandırılmasıdır (Fu ve ark., 2020). Ahşabın termal modifikasyonu, malzemenin 15 dakikadan 24 saate kadar sürelerle 100 ile 300°C arasında bir sıcaklığa maruz bırakılmasını içeren bir işlemdir. İşlem döngüsüne bağlı olarak, işlenmiş malzemelerde farklı özellikler elde etmek mümkündür. Örneğin, işlemin amacı, ısı ve buhar kullanarak ahşabı yumuşatmak, iç gerilimi gidermek ve sonraki üretim süreçlerini kolaylaştırmak; veya boyutsal kararlılığı ve dayanıklılığı iyileştirmek için malzemenin kontrollü bir şekilde bozulmasını sağlamak olabilmektedir. Bu amaçla, sıcaklık aralığı genellikle 150 ile 260°C arasında oluğu bildirilmiştir (Jones ve ark., 2019; Gennari ve ark., 2021).

Ağartıcı madde, kimyasal reaksiyon yoluyla bir maddeyi aydınlatan veya beyazlatan bir malzemedir. Ağartma reaksiyonları genellikle renk sistemlerini bozan oksidatif veya redüktif süreçleri içermektedir. Bu süreçler, maddedeki kromoforik grupların tahrip edilmesini veya değiştirilmesini ve renk maddelerinin ağartma işleminde daha kolay uzaklaştırılabilen daha küçük, daha çözünür birimlere ayrışmasını içerebilmektedir. En yaygın ağartıcı maddeler genellikle iki kategoriye ayrılmaktadır: klor ve ilgili bileşikler (sodyum hipoklorit gibi) ve hidrojen peroksit ve sodyum perborat gibi peroksijen ağartıcı maddeler. İndirgeyici ağartıcılar başka bir kategoriye temsil etmektedir (Farr ve ark., 2000). Ahşap ağartıcı, ahşabı beyazlatmak ve tanen lekelerini gidermek için kullanılan %95'ten fazla saflıkta oksalik asit formülasyonudur (Douglas ve ark., 2025).

Farklı tip, yapı ve görünümdeki ahşap parkeler, konut binalarında, belediye binalarında, kamu binalarında ve spor salonlarında en yaygın döşeme elemanları arasındadır. Günlük yaşamımızda döşeme yüzeylerinin çeşitli etkilere (çeşitli sıvılara, deterjanlara ve diğer çeşitli lekeleyici veya aşındırıcı maddelere maruz kalma, film tabakasının çizilmesi veya daha derin plastik deformasyonlara yol açan daha büyük yükler, çeşitli darbeler, belirli bir yerin daha fazla maruz kalması nedeniyle kaplama filminin aşınması vb.) sık sık maruz kalması, döşemeyi iç mekânda en çok maruz kalan unsurlardan biri haline getirmektedir. Ahşap döşemelerin işlevselliğini ve görünümünü korumak için, tarih boyunca doğal maddelere (yağlar ve balmumları) dayalı farklı tipte yüzey kaplamaları kullanıldığı bildirilmiştir (Williams, 1999; Pavlič ve ark., 2021).

Ahşap döşeme ve kaplamaların kalitesi esas olarak yüzey sertliği, aşınma direnci, darbe direnci, boyutsal kararlılık ve renk kararlılığı ile belirlenir. Ahşap döşemelerin yüzey kalitesini değerlendirmek için, topuk izi direnci de dahil olmak üzere bazı yeni testler ortaya çıkmaktadır (Sykes, 2005; Koubaa, 2007).

Bu çalışmada, farklı işlemler gördükten sonra yüzeylerine tek ve çift komponentli parke vernikleri uygulanmış dişbudak odununda ev içi kimyasalına maruz kalmanın renk parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, adı dışbudak (*Fraxinus excelsior*) odununa ait olan deney örnekleri 90 mm x 90 mm x 15 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Örnekler üzerinde iklimlendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir (ISO 554, 1976).

Isıl işlem uygulamaları 212°C’de 2 saat süre ile yapılmıştır. Isıl işlem görmüş ve görmemiş yüzeyler farklı iki tip ağartma kimyasalları [oksalik asit ($C_2H_2O_4$) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) + sodyum hidroksit ($NaOH$)] ile ağartılmışlardır.

Ağartılmış ve ağartılmamış olan ısıtılmış ve işlemsiz yüzeyler üzerinde tek ve çift komponentli parke vernikleri endüstriyel uygulamalara göre fırça yardımı ile uygulanmıştır (ASTM D 3023-98, 2017). Çalışmaya ait olan deney grupları aşağıda verilmiştir.

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek, yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek, yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneği, deney grubundaki tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneği, deney grubundaki iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılmış test numunesi, tek bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılmış test numunesi, iki bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - 1: Deney grubundan alınan ve 200°C’de 2 saat süreyle ısıtılmış numune, yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - 2: Deney grubundan alınan ve 200°C’de 2 saat süreyle ısıtılmış numune, yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - OA - 1: 200°C’de 2 saat ısıtılımdan geçirildikten sonra oksalik asit ile ağartılan test numunesi, tek bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - OA - 2: 200°C’de 2 saat ısıtılımdan geçirildikten sonra oksalik asit ile ağartılan test numunesi, iki bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - HP - SH - 1: 200°C’de 2 saat ısıtılımdan sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test numunesi, tek bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - HP - SH - 2: 200°C’de 2 saat süreyle ısıtılımdan geçirildikten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test numunesi, iki bileşenli parke verniği uygulanan deney grubundaki ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Daha sonra yüzeyler üzerinde beyaz sirke ile muamele edilmiş filtre kağıdına 18 saat süre ile maruz bırakılmışlardır (TS EN 12720+A1, 2015). Yüzey renk değişimleri, bir renk cihazı ve ASTM D 2244-3 (2007) standardı ile belirlenmiştir. ΔC^* parametresi renk doygunluğundaki farkı, ΔH^* ise ton veya gölge farklılığını ifade etmektedir (Lange, 1999).

Toplam renk farkları aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır.

$$\Delta C^* = (C^*_{\text{işlem görmüş}}) - (C^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (1)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{0.5} \quad (2)$$

$$h^0 = \arctan (b^*/a^*) \quad (3)$$

$$\Delta H^* = [(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{0.5} \quad (4)$$

$$\Delta a^* = (a^*_{\text{işlem görmüş}}) - (a^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (5)$$

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0.5} \quad (6)$$

$$\Delta L^* = (L^*_{\text{işlem görmüş}}) - (L^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (7)$$

$$\Delta b^* = (b^*_{\text{işlem görmüş}}) - (b^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (8)$$

Çizelge 1’de Jirouš ve Ljuljka, (1999)’ya göre renk değişim aralığı ile ilgili ve Δa^* , ΔL^* , Δb^* ve ΔC^* değerleri için (Lange, 1999) bazı önemli bilgiler gösterilmektedir.

Çizelge 1. Renk parametreleri ile ilgili önemli bilgiler

Δa^* , ΔL^* , Δb^* ve ΔC^* (Lange, 1999)	Parametre	Referansa göre durumu		
		Negatif		Pozitif
	Δb^*	Daha mavi		Daha sarı
	ΔL^*	Daha koyu		Daha açık
	Δa^*	Daha yeşil		Daha kırmızı
	ΔC^*	Mat, daha bulanık		Daha net ve daha parlak
Jirouš ve Ljuljka, (1999) renk aralığı	ΔE^* aralığı	Renk değişim tahmini	ΔE^* aralığı	Renk değişim tahmini
	< 0.20	Anlaşılamaz	3.00 - 6.00	Çok belirgin
	0.20 - 0.50	Çok hafif	6.00 - 12.00	Yoğun
	0.50 - 1.50	Hafif	> 12.00	Çok yoğun
	1.50 - 3.00	Belirgin		

Bir istatistik programı tarafından standart sapma, varyans analizleri, % değişim oranları, en düşük ve en yüksek ölçümlere ait veriler, ortalamalar, ve homojenlik grupları belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen L^* parametresine sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, Kontrol – 1 (%0.69), Kontrol – 2 (%0.94), Kontrol - OA – 2 (%1.70), Kontrol - HP - SH – 1 (%3.30), Kontrol - HP - SH - 2 (%0.44) ve HT - HP - SH – 2 (%0.69) malzemelerinde artışlar elde edilirken, Kontrol - OA – 1 (%2.68), HT – 1 (%3.20), HT - 2 (%2.84), HT - OA - 1 (%21.19), HT - OA - 2 (%5.63) ve HT - HP - SH – 1 (%17.43) malzemelerinde azalışlar görülmüştür (Çizelge 2).

Çizelge 2. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen L^* parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulanması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	76.48	↑0.69	BC	0.67	75.55	77.45	0.88
	Var	77.01		A*	0.26	76.64	77.42	0.33
Kontrol - 2	Yok	76.21	↑0.94	C	0.51	75.42	77.32	0.67
	Var	76.93		AB	0.41	76.34	77.34	0.54
Kontrol - OA - 1	Yok	71.94	↓2.68	G	0.66	70.69	73.25	0.92
	Var	70.01		I	0.09	69.88	70.19	0.13
Kontrol - OA - 2	Yok	73.08	↑1.70	F	0.48	72.51	74.16	0.66
	Var	74.32		D	0.15	74.09	74.55	0.20
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	71.24	↑3.30	H	0.35	70.67	71.61	0.50
	Var	73.59		E	0.14	73.33	73.75	0.19
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	72.77	↑0.44	F	0.45	71.97	73.60	0.63
	Var	73.09		F	0.08	72.94	73.19	0.11
HT - 1	Yok	33.46	↓3.20	N	0.57	32.46	34.08	1.69
	Var	32.39		O	0.18	32.11	32.64	0.55
HT - 2	Yok	34.54	↓2.84	M	0.30	34.02	35.03	0.86
	Var	33.56		N	0.27	33.11	33.96	0.81
HT - OA - 1	Yok	39.78	↓21.19	L	0.54	39.12	40.94	1.36
	Var	31.35		P	0.60	30.69	32.23	1.90
HT - OA - 2	Yok	43.91	↓5.63	J	1.00	42.24	45.06	2.28
	Var	41.44		K	1.01	39.75	42.85	2.44

HT - HP - SH - 1	Yok	32.01	↓17.43	O	0.37	31.39	32.64	1.15
	Var	26.43		R**	0.86	24.14	27.14	3.24
HT - HP - SH - 2	Yok	33.89	↑0.69	N	0.58	32.75	34.76	1.72
	Var	34.61		M	0.52	33.61	34.99	1.50

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.
Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.
Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasında ait ölçülen a^* parametresine sonuçları Çizelge 3'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, a^* değerlerinde HT - OA – 1 için %2.86, Kontrol - OA – 1 için %4.83, Kontrol - HP - SH – 1 için %0.25 oranlarında artış görülürken, Kontrol – 1 için %20.07, Kontrol – 2 için %4.84, Kontrol - OA – 2 için %10.61, Kontrol - HP - SH – 2 için %6.64, HT – 1 için %7.94, HT – 2 için %9.49, HT - OA – 2 için %8.78, HT - HP - SH – 1 için %149.23 ve HT - HP - SH – 2 için %18.69 oranlarında artışlar belirlenmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasında ait ölçülen a^* parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulaması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	5.68	↓20.07	G	0.24	5.32	5.99	4.16
	Var	4.54		K	0.13	4.32	4.71	2.89
Kontrol - 2	Yok	4.96	↓4.84	IJ	0.21	4.55	5.20	4.27
	Var	4.72		JK	0.15	4.54	4.94	3.23
Kontrol - OA - 1	Yok	7.86	↑4.83	DE	0.20	7.57	8.26	2.54
	Var	8.24		BC	0.21	7.76	8.43	2.49
Kontrol - OA - 2	Yok	6.60	↓10.61	F	0.42	5.66	6.97	6.33
	Var	5.90		G	0.25	5.40	6.20	4.17
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	4.05	↑0.25	L	0.26	3.45	4.41	6.45
	Var	4.06		L	0.10	3.83	4.20	2.44
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	2.41	↓6.64	N	0.25	2.07	2.87	10.27
	Var	2.25		N	0.18	1.98	2.51	7.81
HT - 1	Yok	8.31	↓7.94	B	0.44	7.69	9.09	5.34
	Var	7.65		E	0.36	7.20	8.36	4.75
HT - 2	Yok	8.85	↓9.49	A*	0.25	8.46	9.13	2.77
	Var	8.01		CD	0.30	7.36	8.44	3.73
HT - OA - 1	Yok	5.25	↑2.86	HI	0.37	4.57	5.90	6.98
	Var	5.40		H	0.88	4.41	6.44	16.31
HT - OA - 2	Yok	3.76	↓8.78	L	0.34	3.33	4.26	8.92
	Var	3.43		M	0.38	2.85	4.00	11.11
HT - HP - SH - 1	Yok	3.90	↓149.23	L	0.24	3.38	4.14	6.17
	Var	-1.92		O**	0.25	-2.16	-1.58	-12.83
HT - HP - SH - 2	Yok	6.42	↓18.69	F	0.18	6.16	6.71	2.74
	Var	5.22		HI	0.27	4.83	5.59	5.19

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.
Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen b^* parametresine sonuçları Çizelge 4'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, b^* değerlerinde Kontrol - 1 için %3.08 ve Kontrol - OA - 1 için %5.42 oranlarında artış bulunurken, Kontrol - 2 için %2.35, Kontrol - OA - 2 için %3.52, Kontrol - HP - SH - 1 için %15.80, Kontrol - HP - SH - 2 için %3.94, HT - 1 için %6.92, HT - 2 için %2.26, HT - OA - 1 için %23.78, HT - OA - 2 için %9.09, HT - HP - SH - 1 için %73.96 ve HT - HP - SH - 2 için %10.46 oranlarında azalışlar tespit edilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen b^* parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulaması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	20.43	↑3.08	G	0.52	19.90	21.29	2.52
	Var	21.06		EF	0.22	20.64	21.31	1.04
Kontrol - 2	Yok	21.27	↓2.35	E	0.47	20.46	21.83	2.20
	Var	20.77		FG	0.41	20.34	21.41	1.96
Kontrol - OA - 1	Yok	30.08	↑5.42	B	0.38	29.42	30.53	1.25
	Var	31.71		A*	0.24	31.24	31.98	0.75
Kontrol - OA - 2	Yok	23.61	↓3.52	C	0.45	22.96	24.45	1.92
	Var	22.78		D	0.31	22.28	23.17	1.34
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	23.29	↓15.80	C	0.54	22.60	24.16	2.33
	Var	19.61		H	0.21	19.25	19.84	1.05
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	19.52	↓3.94	H	0.48	18.92	20.38	2.46
	Var	18.75		I	0.19	18.37	18.99	1.02
HT - 1	Yok	11.41	↓6.92	L	0.67	10.42	12.51	5.88
	Var	10.62		M	0.32	10.16	11.14	3.02
HT - 2	Yok	12.86	↓2.26	J	0.36	12.38	13.57	2.76
	Var	12.57		J	0.63	11.30	13.25	5.01
HT - OA - 1	Yok	11.06	↓23.78	L	0.37	10.65	11.72	3.33
	Var	8.43		O	1.12	6.97	9.72	13.29
HT - OA - 2	Yok	12.10	↓9.09	K	0.21	11.89	12.49	1.77
	Var	11.00		LM	0.15	10.76	11.21	1.35
HT - HP - SH - 1	Yok	8.64	↓73.96	O	0.41	8.21	9.47	4.80
	Var	2.25		P**	0.27	1.94	2.77	12.08
HT - HP - SH - 2	Yok	11.28	↓10.46	L	0.53	10.27	12.11	4.67
	Var	10.10		N	0.24	9.63	10.35	2.33

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.

Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasında ait ölçülen C^* parametresine sonuçları Çizelge 5'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, C^* parametresinde Kontrol - 1 için %1.56 ve Kontrol - OA - 1 için %5.40 oranlarında artış elde edilirken, Kontrol - 2 için %2.43, Kontrol - OA - 2 için %4.00, Kontrol - HP - SH - 1 için %15.27, Kontrol - HP - SH - 2 için %4.02, HT - 1 için %7.23, HT - 2 için %4.48, HT - OA - 1 için %18.22, HT - OA - 2 için %9.00, HT - HP - SH - 1 için %68.51 ve HT - HP - SH - 2 için %12.40 oranlarında azalışlar bulunmuştur (Çizelge 5).

Çizelge 5. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasında ait ölçülen C^* parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulaması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	21.21	↑1.56	F	0.54	20.63	22.12	2.57
	Var	21.54		EF	0.25	21.07	21.82	1.15
Kontrol - 2	Yok	21.84	↓2.43	E	0.46	21.05	22.43	2.12
	Var	21.31		F	0.43	20.84	21.94	1.99
Kontrol - OA - 1	Yok	31.09	↑5.40	B	0.39	30.42	31.50	1.25
	Var	32.77		A*	0.24	32.34	33.06	0.74
Kontrol - OA - 2	Yok	24.51	↓4.00	C	0.45	23.84	25.27	1.85
	Var	23.53		D	0.30	23.08	23.92	1.27
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	23.64	↓15.27	D	0.55	22.95	24.56	2.33
	Var	20.03		G	0.21	19.63	20.27	1.07
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	19.67	↓4.02	G	0.50	19.04	20.56	2.54
	Var	18.88		H	0.18	18.54	19.12	0.95
HT - 1	Yok	14.11	↓7.23	K	0.79	13.00	15.34	5.59
	Var	13.09		L	0.39	12.71	13.93	2.98
HT - 2	Yok	15.61	↓4.48	I	0.39	15.21	16.35	2.52
	Var	14.91		J	0.66	13.49	15.72	4.45
HT - OA - 1	Yok	12.24	↓18.22	M	0.45	11.63	13.12	3.70
	Var	10.01		O	1.41	8.40	11.63	14.04
HT - OA - 2	Yok	12.67	↓9.00	LM	0.25	12.35	13.03	1.96
	Var	11.53		N	0.15	11.33	11.76	1.29
HT - HP - SH - 1	Yok	9.40	↓68.51	P	0.39	8.88	10.27	4.16
	Var	2.96		R**	0.36	2.51	3.51	12.24
HT - HP - SH - 2	Yok	12.98	↓12.40	L	0.48	12.10	13.72	3.66
	Var	11.37		N	0.27	10.86	11.68	2.41

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.

Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 1: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - OA - 2: Isıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 1: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Kontrol - HP - SH - 2: Isıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen h^0 parametresine sonuçları Çizelge 6'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, h^0 parametresinde HT - 2 için %3.68, Kontrol - HP - SH - 2 için %0.24, Kontrol - 1 için %4.61, Kontrol - 2 için %0.44, Kontrol - OA - 1 için %0.09, Kontrol - OA - 2 için %1.48, HT - 1 için %0.57, HT - HP - SH - 1 için %98.55 ve HT - HP - SH - 2 için %3.88 oranlarında artışlar bulunurken, Kontrol - HP - SH - 1 için %2.23, HT - OA - 2 için %0.11 ve HT - OA - 1 için %11.11 oranlarında azalışlar elde edilmiştir (Çizelge 6).

Çizelge 6. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması öncesi ve sonrasın ait ölçülen h^0 parametresine sonuçları

Malzeme Türü	Sirke Uygulaması	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Kontrol - 1	Yok	74.45	↑4.61	H	0.45	73.73	75.17	0.61
	Var	77.88		DE	0.31	77.52	78.35	0.39
Kontrol - 2	Yok	76.86	↑0.44	F	0.57	76.34	78.09	0.74
	Var	77.20		EF	0.23	76.70	77.42	0.30
Kontrol - OA - 1	Yok	75.36	↑0.09	G	0.31	74.76	75.72	0.42
	Var	75.43		G	0.35	74.97	76.20	0.46
Kontrol - OA - 2	Yok	74.38	↑1.48	H	0.98	73.47	76.51	1.31
	Var	75.48		G	0.60	74.53	76.47	0.79
Kontrol - HP - SH - 1	Yok	80.09	↓2.23	C	0.66	79.10	81.58	0.82
	Var	78.30		D	0.23	77.95	78.75	0.29
Kontrol - HP - SH - 2	Yok	82.95	↑0.24	B	0.60	81.85	83.76	0.72
	Var	83.15		B	0.58	82.32	83.97	0.69
HT - 1	Yok	53.94	↑0.57	P**	0.59	53.12	54.66	1.10
	Var	54.25		P	1.28	51.86	56.14	2.36
HT - 2	Yok	55.45	↑3.68	O	0.63	54.33	56.40	1.14
	Var	57.49		N	0.82	56.49	59.18	1.42
HT - OA - 1	Yok	64.64	↓11.11	K	1.20	62.62	66.83	1.85
	Var	57.46		N	1.34	55.80	59.15	2.33
HT - OA - 2	Yok	72.74	↓0.11	I	1.40	70.36	74.33	1.92
	Var	72.66		I	1.90	70.10	75.74	2.61
HT - HP - SH - 1	Yok	65.69	↑98.55	J	1.54	63.27	67.63	2.34
	Var	130.43		A*	1.28	127.97	131.98	0.98
HT - HP - SH - 2	Yok	60.30	↑3.88	M	1.24	58.11	61.96	2.06
	Var	62.64		L	1.16	61.16	64.60	1.85

Çalışmada verniksiz deneysel örnek bulunmamaktadır. COV: Varyasyon Katsayısı.
 Verniklenmiş ahşap yüzeyler 18 saat süre boyunca sirkeli suya batırılmış filtreli kâğıt ile muamele edilmiştir.
 Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - OA - 1: Isıtıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - OA - 2: Isıtıl işlem görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 Kontrol - HP - SH - 1: Isıtıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 Kontrol - HP - SH - 2: Isıtıl işlem görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
 HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
 HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtıl işlem gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması tarafından elde edilen toplam renk farklılıklarına ait sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Renk Kriteri (Jirouš ve Ljuljka, 1999) açısından bakıldığında, sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması ile Kontrol - 1, Kontrol - 2, Kontrol - HP - SH - 2, HT - 1 ve HT - 2 malzemeleri “hafif (0.50 - 1.50)” kriterinin, Kontrol - HP - SH - 1 malzemesi “çok belirgin (3.00 - 6.00)” kriterinin, HT - OA - 1 ve HT - HP - SH - 1 malzemeleri “yoğun (6.00 - 12.00)” kriterinin, Kontrol - OA - 1, Kontrol - OA - 2, HT - OA - 2 ve HT - HP - SH - 2 malzemeleri “belirgin (1.50 - 3.00)” kriterinin elde edildiği görülmüştür. ΔE^* değerleri Kontrol - 1 malzemesi için 1.41, Kontrol - 2 malzemesi için 0.90, Kontrol - OA - 1 malzemesi için 2.56, Kontrol - OA - 2 malzemesi için 1.65, Kontrol - HP - SH - 1 malzemesi için 4.37, Kontrol - HP - SH - 2 malzemesi için 0.85, HT - 1 malzemesi için 1.49, HT - 2 malzemesi için 1.32, HT - OA - 1 malzemesi için 8.83, HT - OA - 2 malzemesi için 2.73, HT - HP - SH - 1 malzemesi için 10.29 ve HT - HP - SH - 2 malzemesi için 1.83 olarak belirlenmiştir (Çizelge 7).

Çizelge 7. Vernikli malzemelere sirke suyuna batırılmış filtreli kâğıt uygulanması tarafından elde edilen toplam renk farklılıklarına ait sonuçları

Malzeme Türü	ΔL^* ▼	Δa^* ▼	Δb^* ▼	ΔC^* ▼	ΔH^* ▼	ΔE^* ▼	Renk Kriteri (Jirouš ve Ljuljka, 1999)
Kontrol - 1	0.54	-1.14	0.63	0.34	1.26	1.41	Hafif (0.50 - 1.50)
Kontrol - 2	0.72	-0.24	-0.49	-0.54	0.12	0.90	Hafif (0.50 - 1.50)
Kontrol - OA - 1	-1.92	0.38	1.64	1.68	0.06	2.56	Belirgin (1.50 - 3.00)
Kontrol - OA - 2	1.24	-0.70	-0.82	-0.98	0.44	1.65	Belirgin (1.50 - 3.00)
Kontrol - HP - SH - 1	2.36	0.01	-3.68	-3.62	0.69	4.37	Çok belirgin (3.00 - 6.00)
Kontrol - HP - SH - 2	0.33	-0.16	-0.77	-0.79	-	0.85	Hafif (0.50 - 1.50)
HT - 1	-1.08	-0.66	-0.79	-1.02	0.12	1.49	Hafif (0.50 - 1.50)
HT - 2	-0.98	-0.84	-0.28	-0.70	0.55	1.32	Hafif (0.50 - 1.50)
HT - OA - 1	-8.43	0.15	-2.63	-2.23	1.40	8.83	Yoğun (6.00 - 12.00)
HT - OA - 2	-2.48	-0.33	-1.09	-1.14	-	2.73	Belirgin (1.50 - 3.00)
HT - HP - SH - 1	-5.58	-5.81	-6.39	-6.45	5.75	10.29	Yoğun (6.00 - 12.00)
HT - HP - SH - 2	0.72	-1.20	-1.18	-1.61	0.48	1.83	Belirgin (1.50 - 3.00)

Kontrol - 1: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - 2: İşlem görmemiş test grubundan alınan örnek yüzeyine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - OA - 1: Isıtma işlemi görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - OA - 2: Isıtma işlemi görmemiş ve oksalik asit ile ağartılmış test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
Kontrol - HP - SH - 1: Isıtma işlemi görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
Kontrol - HP - SH - 2: Isıtma işlemi görmemiş ve hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra tek bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
HT - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra iki bileşenli parke verniği uygulanmış ahşap malzemeyi temsil etmektedir.
HT OA - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT OA - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra oksalik asit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT HP - SH - 1: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine tek bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.
HT HP - SH - 2: 212°C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemi gördükten sonra hidrojen peroksit ve sodyum hidroksit ile ağartılan test örneğine iki bileşenli parke verniği uygulamasına sahip deney örneklerini temsil etmektedir.

Çizelge 8'de varyans analizi sonuçlarını sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre, malzeme türü (A), sirke emdirilmiş filtre uygulaması (B) ve etkileşim (AB) anlamlı olarak elde edilmiştir (Çizelge 8).

Çizelge 8. Varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Test	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	p<0.05 (*: Anlamlı)
Malzeme Türü (A)	<i>L</i> *	94272.660	11	8570.242	30834.750	0.000*
	<i>a</i> *	1153.738	11	104.885	1008.382	0.000*
	<i>b</i> *	11849.256	11	1077.205	5264.962	0.000*
	<i>C</i> *	11011.597	11	1001.054	3934.045	0.000*
Sirke Emdirilmiş Filtre Uygulaması (B)	<i>L</i> *	34121.297	11	3101.936	3367.408	0.000*
	<i>L</i> *	88.549	1	88.549	318.590	0.000*
	<i>a</i> *	46.244	1	46.244	444.599	0.000*
	<i>b</i> *	104.821	1	104.821	512.326	0.000*
Etkileşim (AB)	<i>C</i> *	121.183	1	121.183	476.237	0.000*
	<i>h</i> ⁰	1788.860	1	1788.860	1941.955	0.000*
	<i>L</i> *	525.406	11	47.764	171.850	0.000*
	<i>a</i> *	146.400	11	13.309	127.956	0.000*
Hata	<i>b</i> *	241.153	11	21.923	107.151	0.000*
	<i>C</i> *	228.027	11	20.730	81.466	0.000*
	<i>h</i> ⁰	19558.759	11	1778.069	1930.241	0.000*
	<i>L</i> *	60.035	216	0.278		
Toplam	<i>a</i> *	22.467	216	0.104		
	<i>b</i> *	44.193	216	0.205		
	<i>C</i> *	54.963	216	0.254		
	<i>h</i> ⁰	198.972	216	0.921		
Düzeltilmiş Toplam	<i>L</i> *	803457.665	240			
	<i>a</i> *	7935.533	240			
	<i>b</i> *	77314.702	240			
	<i>C</i> *	85233.913	240			
	<i>h</i> ⁰	1316061.780	240			
	<i>L</i> *	94946.651	239			
	<i>a</i> *	1368.849	239			
	<i>b</i> *	12239.423	239			
	<i>C</i> *	11415.770	239			
	<i>h</i> ⁰	55667.888	239			

4. Sonuçlar

Çalışmada kullanılan beyaz sirke bütün tek ve çift komponentli parke vernikleri ile kaplanmış ahşap yüzeyler üzerinde renk parametrelerini değiştirmiştir.

Kaynaklar

- ASTM D 2244-3, (2007). Standard practice for calculation or color tolerances and color, differences from instrumentally measured color coordinates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 3023-98, (2017). Standard practice for determination of resistance of factory-applied coatings on wood products to stains and reagents. ASTM International.
- Douglas, S., Cole, J.B., Oakland, C.L., and Olives, T.D., (2025). Acute kidney failure from ingestion of “wood bleach” beekeeping miticide, The American Journal of Emergency Medicine, 90: 253-e1. DOI: 10.1016/j.ajem.2024.11.052.
- Farr, J.P., Smith, W.L., and Steichen, D.S., (2000). Bleaching agents. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. DOI: 10.1002/0471238961.1921182206011818.a01.pub2.
- Fu, Z., Zhou, F., Gao, X., Weng, X., and Zhou, Y., (2020). Assessment of mechanical properties based on the changes of chromatic values in heat treatment wood, Measurement, 152: 107215. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107215.
- Fu, Z., Zhou, Y., Gao, X., Liu, H., and Zhou, F., (2019). Changes of water related properties in radiata pine wood due to heat treatment, Construction and Building Materials, 227: 116692. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116692.

- Gennari, E., Picchio, R., and Lo Monaco, A., (2021). Industrial heat treatment of wood: study of induced effects on ayous wood (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum), *Forests*, 12(6): 730. DOI: 10.3390/f12060730.
- ISO 554, (1976). Standard atmospheres for conditioning and/or testing, International Standardization Organization, Geneva, Switzerland.
- Jirouš, R.V., and Ljuljka, B., (1999). Boja drva i njezine promjene prilikom izlaganja atmosferskim utjecajima, *Drvena Industrija*, 50(1): 31-39.
- Jones, D., Sandberg, D., Goli, G., and Todaro, L., (2019). Wood Modification in Europe: a state-of-the-art about processes, products and applications (p. 123). Firenze University Press. DOI: 10.36253/978-88-6453-970-6.
- Koubaa, A., (2007). Surface properties of oil finished hardwood floorings. ISCHP 07, September 24-26, 2007, 75-80.
- Lange, D.R., (1999). Fundamentals of Colourimetry - Application Report No. 10e. DR Lange: New York, NY, USA.
- Pavlič, M., Petrič, M., and Žigon, J., (2021). Interactions of coating and wood flooring surface system properties, *Coatings*, 11(1): 91. DOI: 10.3390/coatings11010091.
- Sykes, D., (2005). Wood innovations. *Polymers Paint Colour Journal*, 195(4484): 74-75.
- TS EN 12720+A1, (2015). Mobilya - Soğuk sıvılara karşı yüzey dayanıklılığının değerlendirilmesi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Williams, R.S., (1999). Finishing of wood. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General technical report FPL; GTR-113: Pages 15.1-15.37, 113.

PAMUK KUMAŞLARIN ZERDEÇAL TOZU VE ŞAP MADDESİYLE BOYANMASI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Arş. Gör. Dr. Keziban SELÇUK

Atatürk Üniversitesi, Oltu Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Grafik Tasarımı Pr., Oltu,
Erzurum, Türkiye

kselcuk@atauni.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-3460-4457

Doç. Dr. Ümit AYATA

*Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü,
Bayburt, Türkiye

*Sorumlu yazar: umitayata@yandex.com, ORCID ID: 0000-0002-6787-7822

Özet

Bu çalışmada, bir cam kap içerisinde (60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması) pamuk kumaşların(grup başına 1’er gr), farklı oranlarda şap maddesinin (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 gr) ve zerdeçal (*Curcuma longa* L.) bitkisine ait tozun (grup başına 1’er gr) kaynatılması ile elde edilen boyalı kumaşlar ile boyasız kumaşlar üzerinde ölçülen renk parametrelerindeki değişimleri araştırılmıştır. 7 farklı deney grubu örneği oluşturulmuştur. Malzeme 1 kontrol deney grubunu oluştururken, diğer malzemeler farklı oranlarda şap maddesini içeren boyanmış deney örneklerini temsil etmektedir. Şap maddesinin kullanılması ile ΔE^* değerlerinde ciddi oranlarda farklılıklar elde edilmiştir. Şap kullanılmayan pamuk kumaşı örnekleri ile şap kullanılan pamuk kumaşı örneklerine kıyasla ΔE^* değerleri 0.0 g şap ile 53.58, 0.5 g şap ile 74.12, 1.0 g şap ile 89.04, 1.5 g şap ile 77.55, 2.0 g şap ile 78.02 ve 2.5 g şap ile 86.79 şeklinde belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Pamuk kumaş, zerdeçal, şap, renk parametreleri, boyama

A Study on Dyeing Cotton Fabrics with Turmeric Powder and Alum

Abstract

This study investigated the changes in color parameters measured on dyed cotton fabrics (1 g per group), different ratios of alum (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 g), and turmeric (*Curcuma longa* L.) powder (1 g per group) obtained by boiling them in a glass container (at 100°C for 60 min) and on undyed fabrics. Seven different experimental groups were created. Material 1 constituted the control group, while the other materials represented dyed experimental samples containing different ratios of alum. Significant differences in ΔE^* values were obtained with the use of alum. The ΔE^* values were determined as follows when comparing cotton fabric samples without alum to cotton fabric samples with alum: 0.0 g alum: 53.58, 0.5 g alum: 74.12, 1.0 g alum: 89.04, 1.5 g alum: 77.55, 2.0 g alum: 78.02, and 2.5 g alum: 86.79.

Keywords: Cotton fabric, turmeric, alum, color parameters, dyeing

1. Giriş

Boyama, eski çağlardan beri uygulanmış ve günümüzdeki gelişimine ulaşana kadar birçok değişime uğramıştır. İlk dönemlerde tekstiller bitki ve hayvansal kaynaklar kullanılarak boyanırken, sentetik boyaların ortaya çıkmasıyla birlikte, sentetik boyalar çeşitli ton ve renkler verdiğinden, tekstillerde doğal boyaların kullanımı ortadan kalktığı bildirilmiştir (Deo ve Desai, 1999; Bhatti ve ark., 2010).

Doğal ürünlerin çok çeşitli uygulamaları vardır. Bazıları ilaç olarak kullanılırken, diğerleri önemli biyolojik özelliklere sahiptir veya besin takviyesi, boya, aroma verici madde veya kozmetik endüstrisinde içerik maddesi olarak kullanılmaktadır (Cordell, 2002; Balaji ve Chempakam, 2010).

Safran, kırmızıbiber, zerdeçal, pancar ekstraktı ve yaprakları doğal renklendiricilerdir. Doğal renklendiriciler eskiden olduğu gibi kullanıldığı bildirilmiştir. Pancar suyu, beta-karoten, yaban mersini suyu konsantresi, havuç suyu, üzüm kabuğu özütü, kırmızıbiber, mor tatlı patates veya mısır, kırmızılaha ve zerdeçal çok çeşitli renkler üretmek için kullanılabilir. Doğal boyalar genellikle yüksek kalite standartlarıyla sağlanmaktadır ve doğal boyalarda, yapay boyalarda sıklıkla bulunan yoğun renklendirici maddeler bulunmaz. Doğal kaynaklı renklendiriciler, renklendirici özelliklerinin yanı sıra tıbbi değere de sahip oldukları bildirilmiştir (Delgado-Vargas ve Paredes-Lopez, 2003).

Zerdeçal (*Curcuma longa* L.), aromatik rizomları için yetiştirilen önemli bir ticari üründür. Zerdeçal, M.Ö. 4000 yılından beri baharat, koruyucu ve bazı hastalıkların tedavisinde geleneksel tıp olarak kullanılmaktadır. Hindistan en büyük zerdeçal üreticisi, ithalatçısı ve ihracatçısıdır. Bununla birlikte, birçok diğer Asya, Latin Amerika ve Karayip ülkesi de artık zerdeçal üretmektedir. Küresel zerdeçal üretimi yaklaşık 1.100.000 ton/yıl'dır (Nair, 2013; Osorio-Tobon ve ark., 2014).

Zerdeçal, Zingiberaceae familyasından otsu, her dem yeşil bir bitkidir. Asya'da, özellikle Hindistan ve Çin'de yaygın olarak yetiştirilmektedir. Muhtemelen Hindistan kökenli olan zerdeçal, Hindistan'da en az 2500 yıldır kullanılmaktadır (Kapoor, 2000; Verma ve ark., 2018). Bu bitki, 1 metreye kadar boylanabilen, kısa saplı, çok yıllık bir bitkidir. Dünyanın tropikal ve subtropikal bölgelerinde yaygın olarak yetiştirilmektedir ve Asya ülkelerinde, özellikle Hindistan ve Çin'de yaygın olarak yetiştirilmektedir. Hindistan'da halk arasında "Haldi" olarak bilinmektedir; Malezya, Endonezya ve Hindistan'da ekonomik önemi nedeniyle iyi incelenmiştir. Rizomları dikdörtgen, oval, piramit şeklinde ve genellikle kısa dallıdır ve Nepal'de evlerde kullanılan bir ilaçtır (Eigner ve Scholz, 1999; Araujo ve Leon, 2001).

Geleneksel olarak karaciğer tıkanıklığı, iltihaplanma, ülser, sarılık, dizanteri, taze yaralar, diyabet, mide rahatsızlıkları, böcek sokmaları ve suçiçeği ve çiçek hastalığı gibi viral enfeksiyonlar gibi çeşitli hastalıkların/rahatsızlıkların tedavisinde kullanıldığı bildirilmiştir (Nadkarni, 1976; Abbas ve ark., 2010).

Boya maddesi olarak kullanımı nedeniyle zerdeçal toz halinde saklanmaktadır ve pazarlanmaktadır. Rizomun toz haline getirilmesi kurutma yoluyla yapılmaktadır ve bu işlem, nem içeriğini ve su aktivitesini azaltarak ürünün raf ömrünü uzatmaya katkıda bulunmaktadır. Bu da mikroorganizmaların gelişme olasılığını azaltmaktadır ve rizomun özelliklerini etkileyebilecek fiziksel, kimyasal ve duyuşsal reaksiyon olasılığını en aza indirmektedir (Lima ve ark., 2022; Siqueira-de-Lima ve ark., 2024).

Zerdeçalın renginden sorumlu olan kurkuminoid içeriği, zerdeçal çeşidine ve aynı çeşit içinde hasat zamanındaki olgunluğuna bağlıdır. Zerdeçalda %3-5 oranında bulunabilmektedir ve doğru olgunlukta hasat edilmesi, optimum renk ve aroma için önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir (Umbreen ve ark., 2008).

Bu çalışmada, bir cam kap içerisinde pamuk kumaşların, farklı oranlarda şap maddesinin ve zerdeçal (*Curcuma longa* L.) bitkisine ait tozun kaynatılması ile elde edilen boyalı kumaşlar ile boyasız kumaşların renk parametrelerinde meydana gelen değişimleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, pamuk kumaşlar, bir kumaş satıcısından, şap maddesi ve zerdeçal (*Curcuma longa* L.) tozu ise bir aktardan satın alınma yöntemi ile temin edilmiştir.

Deneyisel tasarım aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

Malzeme 1: Kontrol (herhangi bir boyama uygulaması işlemi yapılmamıştır),

Malzeme 2: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,

Malzeme 3: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,

Malzeme 4: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,

Malzeme 5: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.

Malzeme 6: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.

Malzeme 7: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.

Boyanmış ve boyanmamış pamuk kumaşlar üzerinde renk parametreleri bir standart kullanılarak (ASTM D 2244-3, 2007) ölçülmüştür. Aşağıdaki formüller ile toplam renk farklılıkları hesaplanmıştır.

$$\Delta H^* = [(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{0.5} \quad (1)$$

$$\Delta a^* = (a^* \text{ işlem uygulanmış deney örneği}) - (a^* \text{ işlem uygulanmamış}) \quad (2)$$

$$\Delta L^* = (L^* \text{ işlem uygulanmış deney örneği}) - (L^* \text{ işlem uygulanmamış}) \quad (3)$$

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0.5} \quad (4)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{0.5} \quad (5)$$

$$\Delta C^* = (C^* \text{ işlem uygulanmış deney örneği}) - (C^* \text{ işlem uygulanmamış}) \quad (6)$$

$$h^0 = \arctan (b^*/a^*) \quad (7)$$

$$\Delta b^* = (b^* \text{ işlem uygulanmış deney örneği}) - (b^* \text{ işlem uygulanmamış}) \quad (8)$$

Çizelge 1’de Δa^* , ΔL^* , Δb^* ve ΔC^* değerleri hakkında (Lange, 1999) ve Jirouš ve Ljuljka, (1999)’ya göre renk değişim aralığı hakkında bazı önemli bilgiler gösterilmektedir.

Çizelge 1. Renk parametreleri ile ilgili önemli bilgiler

ΔL^* , Δa^* , Δb^* ve ΔC^* (Lange, 1999)	Parametre	Pozitif durumda		Negatif durumda
	Δb^*	Referansa göre daha sarı		Referansa göre daha mavi
	Δa^*	Referansa göre daha kırmızı		Referansa göre daha yeşil
	ΔC^*	Referansa göre, daha net ve daha parlak		Mat, referansa göre daha bulanık
	ΔL^*	Referansa göre daha açık		Referansa göre daha koyu
Jirouš ve Ljuljka, (1999) renk aralığı	ΔE^* aralığı	Renk değişim tahmini	ΔE^* aralığı	Renk değişim tahmini
	< 0.20	Anlaşılmaz	3.00 - 6.00	Çok belirgin
	0.20 - 0.50	Çok hafif	6.00 - 12.00	Yoğun
	0.50 - 1.50	Hafif	> 12.00	Çok yoğun
	1.50 - 3.00	Belirgin		

Bir istatistik programı ile en düşük ve en yüksek veriler, varyans analizleri, ortalamalar, standart sapma, % değişim oranları ve homojenlik grupları hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Renk parametrelerine ait belirlenmiş ölçüm sonuçları Çizelge 2’de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Renk parametrelerine ait belirlenmiş ölçüm sonuçları

Test	Malzeme Türü	Zerdeçal Tozu (gr)	Şap Miktarı (gr)	Ortalama	Değişim Oranı (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
L*	Malzeme 1	0.0	0.0	84.79	-	A*	0.05	84.71	84.86	0.06
	Malzeme 2	1.0	0.0	74.84	↓11.73	B	0.07	74.68	74.95	0.10
	Malzeme 3	1.0	0.5	73.56	↓13.24	D**	0.09	73.40	73.69	0.13
	Malzeme 4	1.0	1.0	73.93	↓12.81	C	0.24	73.68	74.31	0.33
	Malzeme 5	1.0	1.5	73.65	↓13.14	CD	0.23	73.21	73.93	0.31
	Malzeme 6	1.0	2.0	73.58	↓13.22	D	0.39	72.59	73.84	0.53
	Malzeme 7	1.0	2.5	73.63	↓13.16	CD	0.65	72.61	74.23	0.89
a*	Malzeme 1	0.0	0.0	-0.93	-	E**	0.06	-1.03	-0.85	-6.97
	Malzeme 2	1.0	0.0	5.89	↑733.33	A*	0.05	5.81	5.99	0.81
	Malzeme 3	1.0	0.5	4.33	↑565.59	D	0.18	4.13	4.63	4.26
	Malzeme 4	1.0	1.0	4.61	↑595.70	C	0.27	4.16	4.90	5.81
	Malzeme 5	1.0	1.5	4.89	↑625.81	C	0.15	4.68	5.11	3.10
	Malzeme 6	1.0	2.0	5.37	↑677.42	B	0.31	5.15	6.19	5.77
	Malzeme 7	1.0	2.5	4.83	↑619.35	C	0.65	4.20	5.79	13.45
b*	Malzeme 1	0.0	0.0	2.67	-	F**	0.08	2.58	2.82	2.98
	Malzeme 2	1.0	0.0	54.87	↑1955.06	E	0.72	54.22	56.38	1.32
	Malzeme 3	1.0	0.5	75.74	↑2736.70	D	0.40	75.17	76.34	0.52
	Malzeme 4	1.0	1.0	90.87	↑3303.37	A*	1.40	88.72	92.09	1.54
	Malzeme 5	1.0	1.5	79.19	↑2865.92	C	0.83	78.35	80.60	1.05
	Malzeme 6	1.0	2.0	79.62	↑2882.02	C	0.41	79.13	80.26	0.52
	Malzeme 7	1.0	2.5	88.54	↑3216.10	B	1.74	86.03	90.83	1.97
C*	Malzeme 1	0.0	0.0	2.83	-	F**	0.09	2.72	2.98	3.09
	Malzeme 2	1.0	0.0	55.19	↑1850.18	E	0.72	54.54	56.70	1.31
	Malzeme 3	1.0	0.5	75.85	↑2580.21	D	0.41	75.28	76.48	0.55
	Malzeme 4	1.0	1.0	90.99	↑3115.19	A*	1.41	88.81	92.22	1.55
	Malzeme 5	1.0	1.5	79.35	↑2703.89	C	0.83	78.50	80.75	1.05
	Malzeme 6	1.0	2.0	79.86	↑2721.91	C	0.42	79.30	80.44	0.52
	Malzeme 7	1.0	2.5	88.67	↑3033.22	B	1.70	86.22	90.93	1.92
h°	Malzeme 1	0.0	0.0	109.32	-	A*	1.06	108.17	111.36	0.97
	Malzeme 2	1.0	0.0	83.87	↓23.28	E**	0.05	83.78	83.95	0.06
	Malzeme 3	1.0	0.5	86.73	↓20.66	BC	0.12	86.53	86.86	0.14
	Malzeme 4	1.0	1.0	87.10	↓20.33	B	0.13	86.95	87.31	0.14
	Malzeme 5	1.0	1.5	86.47	↓20.90	CD	0.09	86.32	86.60	0.11
	Malzeme 6	1.0	2.0	86.15	↓21.19	D	0.21	85.58	86.30	0.24
	Malzeme 7	1.0	2.5	86.87	↓20.54	BC	0.48	86.20	87.35	0.55
Malzeme 1: Kontrol (herhangi bir boyama işlemi yapılmamıştır), Malzeme 2: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 3: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 4: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 5: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması. Malzeme 6: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması. Malzeme 7: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması. Homojenlik Grubu sütunu için *: En yüksek sonuç, **: En düşük sonuç, Ölçüm Sayısı: 10										

Herhangi bir boyama uygulaması yapılmamış kumaşlarla mordanlı ve mordansız deney örnekleri kıyaslandığında, L* (mordansız boyama ile %11.73 ve mordanlı boyamalar ile %12-13 arasında) ve h° (mordansız boyama ile %23.28 ve mordanlı boyamalar ile %20-21 arasında) değerlerinde azalışların olduğu tespit edilirken, a* (mordansız boyama ile %733 ve mordanlı

boyamalar ile %565-677 arasında), C^* (mordansız boyama ile %1850 ve mordanlı boyamalar ile %2580-3115 arasında), ve b^* (mordansız boyama ile %1955 ve mordanlı boyamalar ile %2736-3303 arasında) değerlerinde artışların olduğu belirlenmiştir. En yüksek sonuçlar h^0 ve L^* parametresinde kontrol deney örneklerinde bulunurken, en düşük sonuçlar ise C^* , b^* ve a^* parametresinde yine kontrol deney örneklerinde tespit edilmiştir (Çizelge 2).

Renk parametrelerine ait varyans analizi sonuçları Çizelge 3’de verilmiştir. Bütün renk parametrelerinde malzeme türünün anlamlı olarak elde edildiği görülmüştür (Çizelge 3).

Çizelge 3. Varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Test	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$p \leq 0.05$ (*: Anlamlı)
Malzeme Türü	L^*	1036.309	6	172.718	1712.584	0.000*
	a^*	315.723	6	52.621	565.095	0.000*
	b^*	57029.632	6	9504.939	10180.511	0.000*
	C^*	56971.023	6	9495.170	10289.277	0.000*
	h^0	4654.485	6	775.748	3750.138	0.000*
Hata	L^*	6.354	63	0.101		
	a^*	5.866	63	0.093		
	b^*	58.819	63	0.934		
	C^*	58.138	63	0.923		
	h^0	13.032	63	0.207		
Toplam	L^*	399269.315	70			
	a^*	1520.368	70			
	b^*	374663.909	70			
	C^*	376274.535	70			
	h^0	565406.497	70			
Düzeltilmiş Toplam	L^*	1042.663	69			
	a^*	321.590	69			
	b^*	57088.452	69			
	C^*	57029.161	69			
	h^0	4667.517	69			
Malzeme 1: Kontrol (herhangi bir boyama işlemi yapılmamıştır), Malzeme 2: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 3: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 4: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 5: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 6: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması, Malzeme 7: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.						

Toplam renk farklılıklarına ait sonuçları Çizelge 4’de verilmiştir. ΔE^* değerlerinde elde edilen farklılıklar şap maddesinin kullanılması ile elde edilmiştir. Şap kullanılmayan örnekler ile şap kullanılan örneklerle kıyasla 0.5 gr şap ile %38.34, 1.0 gr şap ile %66.18, 1.5 gr şap ile %44.74, 2.0 gr şap ile %45.61 ve 2.5 gr şap ile %61.98 oranlarında artış verilerine ulaşılmıştır. Bütün mordanlı ve mordansız deney örneklerinde ölçülen değerler sonrasında yapılan hesaplamalar ile Δa^* değerlerinin pozitif elde edilmesi ile referansa göre daha kırmızı sonucuna, Δb^* değerlerinin pozitif elde edilmesi ile referansa göre daha sarı sonucuna, ΔC^* değerlerinin pozitif elde edilmesi ile referansa göre, daha net ve daha parlak sonucuna ve ΔL^* değerlerinin negatif elde edilmesi ile de referansa göre daha açık sonucuna ulaşıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, renk kriteri (Jirouš ve Ljuljka, 1999) açısından bütün mordanlı ve mordansız deney örneklerinde “çok yoğun (> 12.00)” kriterinin elde edildiği de görülmektedir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Toplam renk farklılıklarına ait sonuçları

Uygulama Üzerindeki Farklılıkların Sonuçları			ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*	Renk kriteri (Jirouš ve Ljuljka, 1999)
Malzeme Türü	Zerdeçal Tozu (gr)	Şap Miktarı (gr)							
Malzeme 2	1.0	0.0	-9.96	6.82	52.21	52.36	5.50	53.58	Çok yoğun (> 12.00)
Malzeme 3	1.0	0.5	-11.23	5.26	73.08	73.03	5.87	74.12	
Malzeme 4	1.0	1.0	-10.87	5.54	88.20	88.16	6.18	89.04	
Malzeme 5	1.0	1.5	-11.15	5.82	76.53	76.52	5.92	77.55	
Malzeme 6	1.0	2.0	-11.22	6.30	76.95	77.04	5.16	78.02	
Malzeme 7	1.0	2.5	-11.16	5.76	85.87	85.85	6.13	86.79	
Malzeme 2: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,									
Malzeme 3: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 0.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,									
Malzeme 4: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması,									
Malzeme 5: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 1.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.									
Malzeme 6: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.0 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.									
Malzeme 7: 1.0 gr pamuk kumaşın 50 ml su + 1.0 gr zerdeçal tozu + 2.5 gr şap ile cam bir kapta 60 dakikada ve 100°C’de sıcak suda kaynatılması.									

4. Sonuçlar

Çalışmada kullanılan şap ve zerdeçal tozu maddelerinin pamuklu kumaşlar için renk parametreleri üzerinde değişimlere neden olduğu belirlenmiştir.

Kaynaklar

- Abbas, R.Z., Iqbal, Z., Khan, M.N., Zafar, M.A., and Zia, M.A., (2010). Anticoccidial activity of *Curcuma longa* L. in broilers, Brazilian Archives of Biology and Technology, 53: 63-67. DOI: 10.1590/S1516-89132010000100008.
- Araujo, C.A.C., and Leon, L.L., (2001). Biological activities of *Curcuma longa* L., Memórias do Instituto Oswaldo Cruz, 96: 723-728. DOI: 10.1590/S0074-02762001000500026.
- ASTM D 2244-3, (2007). Standard practice for calculation or color tolerances and color, differences from instrumentally measured color coordinates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Balaji, S., and Chempakam, B., (2010). Toxicity prediction of compounds from turmeric (*Curcuma longa* L), Food and Chemical Toxicology, 48(10): 2951-2959. DOI: 10.1016/j.fct.2010.07.032.
- Bhatti, I.A., Adeel, S., Jamal, M.A., Safdar, M., and Abbas, M., (2010). Influence of gamma radiation on the colour strength and fastness properties of fabric using turmeric (*Curcuma longa* L.) as natural dye, Radiation Physics and Chemistry, 79(5): 622-625. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2009.12.006.
- Cordell, G.A., (2002). Natural products in drug discovery—creating a new vision. Phytochemistry Reviews, 1(3): 261-273. DOI: 10.1023/A:1026094701495.
- Delgado-Vargas, F., and Paredes-Lopez, O., (2003). Natural colorants for food and nutraceutical uses, CRC press. DOI: 10.1201/9781420031713.
- Deo, H.T., and Desai, B.K., (1999). Dyeing of cotton and jute with tea as a natural dye, Coloration Technology, 115(7-8): 224-227. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1999.tb00360.x.
- Eigner, D., and Scholz, D., (1999). Ferula asa-foetida and Curcuma longa in traditional medical treatment and diet in Nepal, Journal of Ethnopharmacology, 67(1): 1-6. DOI: 10.1016/S0378-8741(98)00234-7.

- Jirouš, R.V., and Ljuljka, B., (1999). Boja drva i njezine promjene prilikom izlaganja atmosferskim utjecajima, *Drvena Industrija*, 50(1): 31-39.
- Kapoor, L.D., (2000). *Handbook of Ayurvedic Medicinal Plants*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Lange, D.R., (1999). *Fundamentals of Colourimetry - Application Report No. 10e*. DR Lange: New York, NY, USA.
- Lima, M.S.D., resende, O., Placido, G.R., Silva, J.A.G.E., Celia, J.A., Caliar, M., de Oliveira, D.E.C., Correia, J.S., and Silva, M.A.P.D., (2022). Effects of drying temperature on the bioactive and technological properties of turmeric (*Curcuma longa* L.) flour, *Food Science and Technology*, 42: e76122. DOI: 10.1590/fst.76122.
- Nadkarni, K.M. (1976), *Indian Materia Medica*, Popular Prakashan: Bombay, pp. 850-854.
- Nair, K.P., (2013). *The agronomy and economy of turmeric and ginger: the invaluable medicinal spice crops*. Newnes.
- Osorio-Tobon, J.F., Carvalho, P.I., Rostagno, M.A., Petenate, A.J., and Meireles, M.A.A., (2014). Extraction of curcuminoids from deflavored turmeric (*Curcuma longa* L.) using pressurized liquids: Process integration and economic evaluation,. *The Journal of Supercritical Fluids*, 95: 167-174. DOI: 10.1016/j.supflu.2014.08.012.
- Ramesh, M., and Muthuraman, A., (2018). Flavoring and coloring agents: Health risks and potential problems, In *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes* (pp. 1-28). Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-811518-3.00001-6.
- Siqueira-de-Lima, M., Cagnin, C., Borges-Machado, A.L., Ribeiro-Sanches, M.A., Telis-Romero, J., and Resende, O., (2024). Thermodynamic approach on water vapor sorption of *Curcuma longa* L. Flour, *LWT*, 206, 116592. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116592.
- Umbreen, S., Ali, S., Hussain, T., and Nawaz, R., (2008). Dyeing properties of natural dyes extracted from turmeric and their comparison with reactive dyeing, *Research Journal of Textile and Apparel*, 12(4): 1-11. DOI: 10.1108/RJTA-12-04-2008-B001.
- Verma, R.K., Kumari, P., Maurya, R.K., Kumar, V., Verma, R.B., and Singh, R.K., (2018). Medicinal properties of turmeric (*Curcuma longa* L.): A review, *International Journal of Chemical Studies*, 6(4): 1354-1357.

ADAPTIVE REUSE OF HISTORICAL BUILDINGS IN BAKU: CONTEMPORARY CHALLENGES AND INNOVATIVE SOLUTIONS

Prof. Dr. Kamran Guliyev

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Azerbaijan

Leyla Mammadova

Baku State University, Azerbaijan

Abstract

This paper explores the current landscape of adaptive reuse projects involving historical buildings in Baku, a city known for its layered architectural heritage. It investigates the strategies and challenges faced by architects, developers, and conservationists when converting old structures into functional contemporary spaces while preserving cultural and historical value. Qualitative research, including interviews with architects and site analyses, reveals that Baku's rapid economic development and expansion have led to an increased demand for new uses for obsolete or underutilized buildings. However, historic preservation regulations, urban zoning laws, and technical issues such as structural retrofitting present major barriers. Successful projects showcase creative approaches to structural reinforcement, incorporation of modern amenities, and community engagement processes that honor both tradition and innovation. The study concludes that adaptive reuse, when rooted in context-sensitive design, contributes significantly to urban sustainability, cultural continuity, and city identity. Policy recommendations emphasize the need for clearer preservation guidelines, interdisciplinary collaboration, and public education campaigns to foster appreciation and support for adaptive reuse among both stakeholders and the wider population.

Keywords: adaptive reuse, Baku, historical buildings, urban sustainability, cultural heritage

INTEGRATING TRADITIONAL AZERBAIJANI DESIGN PRINCIPLES INTO CONTEMPORARY URBAN HOUSING

Assoc. Prof. Dr. Elvin Hasanov

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Azerbaijan

Nigar Suleymanli

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Azerbaijan

Farid Gasimov

Baku Engineering University, Azerbaijan

Abstract

This study examines the incorporation of traditional Azerbaijani architectural elements—such as courtyard planning, decorative tilework, and local materials—into new urban housing projects. Through field surveys and case studies, the authors analyze both the aesthetic and practical impacts of these design choices, addressing how cultural continuity and innovation can coexist within Baku’s fast-evolving urban fabric. The research finds that projects integrating indigenous design promote stronger community ties, foster passive climate adaptation, and create distinctive local identities amid global architectural trends. However, challenges such as limited material availability and cost constraints persist. The paper advocates for strengthening design curricula with vernacular knowledge and encouraging policy reforms that incentivize culturally rooted architecture. Ultimately, the research underscores the value of combining tradition and modernity in addressing the housing needs of a dynamic population.

Keywords: Azerbaijani architecture, urban housing, traditional design, cultural continuity, vernacular

SUSTAINABLE FLOOD-RESISTANT ARCHITECTURE FOR BANGLADESH'S GROWING DELTA REGIONS

Dr. Mustafa Rahman

Bangladesh University of Engineering and Technology, Bangladesh

Assis. Prof. Dr. Nabila Hasan

University of Dhaka, Bangladesh

Tariq Chowdhury

Ahsanullah University of Science and Technology, Bangladesh

Samia Akhtar

Chittagong University of Engineering and Technology, Bangladesh

Abstract

With climate change intensifying monsoonal flooding and sea-level rise, the need for innovative flood-resistant architecture in Bangladesh has become critical. This paper investigates sustainable design strategies for housing in deltaic regions, where vulnerability to water is a daily reality. The researchers review traditional stilt and floating structures as well as new material technologies and passive water management solutions. Fieldwork, community feedback, and simulation analyses demonstrate the benefits and limitations of each system. Notably, vernacular approaches—modified through the integration of engineered solutions—emerge as both culturally appropriate and cost-effective. The research calls for participatory design processes, hybrid construction models, and government incentives to promote wider adoption of resilient building practices. Future directions include digital modeling of hydrological impacts and more robust collaboration between engineers, architects, and end-users.

Keywords: flood-resistant architecture, sustainable design, Bangladesh, climate adaptation, delta regions

**URBAN DENSIFICATION AND GREEN SPACE PRESERVATION IN DHAKA:
DESIGN STRATEGIES AND POLICY APPROACHES**

Prof. Dr. Sharmin Akter

Bangladesh University of Engineering and Technology, Bangladesh

Dr. Nusrat Jahan

University of Asia Pacific, Bangladesh

Abstract

This research addresses the ongoing challenge of balancing urban densification and green space preservation in Dhaka, one of the world's fastest-growing megacities. Through GIS mapping, urban design simulations, and stakeholder interviews, the authors highlight the dangers of unchecked vertical expansion and the resulting ecological imbalances. They examine international and local case studies, suggesting design strategies such as urban parks, vertical greening, and interconnected open spaces as viable interventions. The analysis emphasizes the importance of policy frameworks and community participation for successful green space integration. The study concludes with recommendations for adaptive urban regulations, sustainable landscape planning, and public awareness initiatives to achieve long-term ecological and social resilience in Dhaka.

Keywords: urban densification, green spaces, Dhaka, landscape planning, policy

INTEGRATING MODULAR CONSTRUCTION WITH MALAYSIAN VERNACULAR ARCHITECTURE: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Prof. Dr. Ahmad Rashid
Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia
Farah Nazirah Ramli
Universiti Teknologi MARA, Malaysia
Assis. Prof. Dr. Lim Sze Wee
Universiti Malaya, Malaysia

Abstract

This paper explores the intersection of modular construction technologies and traditional Malaysian vernacular design. Focusing on residential projects, the authors analyze both the technical feasibility and the cultural reception of integrating modularity with features such as intricate woodwork, raised platforms, and open-plan layouts. Case studies and interviews with industry professionals reveal that modular methods can significantly reduce construction waste, time, and costs. Yet, issues around architectural authenticity, regulatory barriers, and skilled labor persist. The research advocates for formalized guidelines and collaborative educational programs to bridge the knowledge gap between modern construction and heritage preservation. Engaging communities in the co-design process is highlighted as key to successful implementation, fostering a sense of ownership and continuity.

Keywords: modular construction, Malaysian architecture, vernacular, heritage, innovation

TROPICAL ENVIRONMENTAL RESPONSIVENESS IN MALAYSIAN UNIVERSITY CAMPUS DESIGN

Assoc. Prof. Dr. Zainab Johari

Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

Harris bin Abdullah

Universiti Sains Malaysia, Malaysia

Dr. Amelia Lee

Universiti Malaya, Malaysia

Abstract

With rising temperatures and increasingly erratic weather, Malaysian university campuses must address environmental challenges through innovative design. This research investigates recent campus projects and retrofits that prioritize natural ventilation, daylighting, and stormwater management. Surveys of students and staff point to increased comfort, reduced energy costs, and improved academic performance resulting from these strategies. The paper also details material sourcing and construction methods that minimize ecological footprints while respecting regional identities. Collaboration between architects, engineers, and environmental scientists emerges as a key success factor. Policy recommendations include integrating environmental responsiveness into university accreditation and increasing funding for pilot projects that showcase best practices for sustainable campus design.

Keywords: campus design, environmental responsiveness, Malaysia, sustainable architecture, tropical climates

**REHABILITATION OF OTTOMAN-ERA BUILDINGS IN SKOPJE: HISTORICAL
ANALYSIS AND CONTEMPORARY CONSERVATION**

Dr. Elena Dimitrova
Prof. Dr. Nikola Jovanovic
Selma Ismaili
Bojan Petrovski

Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia

Abstract

This study examines the rehabilitation efforts of Ottoman-era buildings in Skopje, highlighting the tension between preserving historical authenticity and accommodating new uses. Using archival research, site analysis, and interviews with conservators, the paper evaluates the methods and materials employed in recent restoration projects. The findings reveal both successes—such as the reactivation of historic neighborhoods and tourism growth—and challenges, including resource scarcity, regulatory inconsistencies, and the impact of modern interventions on original fabric. The authors advocate for evidence-based guidelines, capacity-building among professionals, and community involvement to sustain the city's unique heritage amid urban modernization. Special focus is given to cross-border collaborations and EU funding mechanisms supporting heritage conservation in the Balkans.

Keywords: building rehabilitation, Ottoman heritage, Skopje, conservation, historic authenticity

**URBAN TRANSFORMATION AND SOCIAL INCLUSION IN POST-SOCIALIST
SKOPJE: PUBLIC SPACE REDESIGN**

Assoc. Prof. Dr. Danilo Milanovic
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia
Assis. Prof. Dr. Marija Pavlovska
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia
Ana Petreski
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia

Abstract

This article explores the role of public space redesign in fostering social inclusion during Skopje's ongoing urban transformation. Through mixed-methods research, the study analyzes case studies of renovated parks, pedestrian zones, and riverside promenades. Surveys and interviews with diverse residents illuminate shifts in usage patterns, perceptions of safety, and accessibility for vulnerable groups. The authors highlight how participatory planning, artistic interventions, and community events have created spaces of dialogue and mutual recognition. However, they also identify limitations due to bureaucratic hurdles and political contestation. The study concludes that inclusive public space design is vital for healing social divisions and enhancing urban quality of life, recommending greater transparency and democratic engagement in the urban planning process.

Keywords: urban transformation, public space, Skopje, social inclusion, participatory design

RENEWABLE ENERGY INTEGRATION IN SMART GRIDS: CHALLENGES AND SOLUTIONS IN PAKISTAN

Prof. Dr. Imran Malik

National University of Sciences and Technology (NUST), Pakistan

Dr. Tayyaba Zahid

University of Engineering and Technology Lahore, Pakistan

Dr. Bilal Hussain

National University of Sciences and Technology (NUST), Pakistan

Abstract

Focused on Pakistan's evolving energy sector, this paper investigates the integration of renewable energy sources into national smart grids. Employing technical analysis, power flow simulations, and case studies from solar and wind farm projects, the research examines technical challenges such as intermittency, storage limitations, and grid synchronization. The analysis demonstrates how advanced control systems, real-time forecasting, and distributed energy management can overcome operational barriers. Results suggest that policy frameworks, targeted investments, and capacity-building initiatives are fundamental for scaling renewables while maintaining grid stability. The study provides actionable recommendations for policymakers and grid operators, advocating for a diversified, sustainable, and resilient power infrastructure in Pakistan.

Keywords: renewable energy, smart grid, Pakistan, grid synchronization, distributed management

DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR FAULT DETECTION IN HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION LINES

Dr. Maryam Qureshi
NED University of Engineering and Technology, Pakistan
Assis. Prof. Dr. Sheraz Ahmed
COMSATS University Islamabad, Pakistan

Abstract

This paper presents the application of deep learning models for automated fault detection in high-voltage transmission lines. Using actual grid data, the research compares convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs) for pattern recognition in waveform analysis. Experimental results demonstrate that deep learning methods outperform traditional models in detection accuracy, speed, and false positive reduction. Challenges identified include requirements for large training datasets, model interpretability, and integration with existing SCADA systems. The findings highlight the remarkable potential of AI-based solutions for advancing grid reliability, safety, and predictive maintenance in developing energy systems.

Keywords: deep learning, fault detection, transmission lines, AI, predictive maintenance

PHOTOVOLTAIC SYSTEM PERFORMANCE OPTIMIZATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN EGYPTIAN DESERTS

Prof. Dr. Ahlam Abdelrahman

Cairo University, Egypt

Dr. Mostafa Khalil

Cairo University, Egypt

Assis. Prof. Dr. Mariam Fouad

Alexandria University, Egypt

Nada El-Din

Mansoura University, Egypt

Abstract

This research examines the optimization of photovoltaic (PV) system performance in Egypt's desert environments using artificial intelligence. Through experimental deployment and simulation models, neural networks and genetic algorithms are utilized for maximum power point tracking (MPPT), fault diagnostics, and predictive maintenance. Field data show substantial gains in system efficiency and reliability under variable climate conditions. The study addresses practical challenges such as dust accumulation, temperature variability, and equipment aging, proposing hybrid AI-based algorithms for robust control. The authors recommend integrating these technologies into Egypt's national renewable energy plan to meet growing electricity demand with low-carbon sources, positioning the country as a leader in sustainable solar power solutions.

Keywords: photovoltaic systems, Egypt, artificial intelligence, solar energy, performance optimization

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SMART ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE IN CAIRO

Assis. Prof. Dr. Youssef Amin
Ain Shams University, Egypt
Dr. Hoda Samir
The American University in Cairo, Egypt

Abstract

This paper details the systematic design and pilot deployment of smart electric vehicle (EV) charging stations across Cairo. The research includes grid integration studies, real-time data analytics, and economic modeling to determine optimal infrastructure placement. Solutions for peak load management, billing, and driver accessibility are analytically evaluated. Results indicate significant reductions in charging times, balanced load profiles, and improved grid sustainability. Policy implications are discussed regarding incentives, urban planning, and public acceptance. The project illustrates how smart infrastructure can support growing EV adoption, reduce urban pollution, and contribute to Egypt's sustainable transportation future.

Keywords: electric vehicles, smart charging, Egypt, grid integration, sustainable transport

ANALYSIS OF MICROGRID STABILITY UNDER VARIABLE LOAD AND GENERATION CONDITIONS IN KABUL

Dr. Parwiz Hashimi
Kabul University, Afghanistan

Abstract

This study explores the stability and performance of microgrids in Kabul under fluctuating load demands and intermittent renewable generation common to off-grid and rural settings. Using simulation tools and real-time monitoring of local microgrid installations, metrics such as frequency deviation, voltage regulation, and fault tolerance are assessed. The analysis identifies vulnerabilities in protection schemes and underscores the need for adaptive energy management systems. Recommendations include advanced inverter controls, battery integration, and technical training for operators. The paper demonstrates that strategic enhancements can boost energy reliability for communities with limited grid connectivity, supporting Afghanistan's national energy access goals.

Keywords: microgrid stability, Afghanistan, variable load, renewable energy, voltage regulation

EFFICIENT POWER CONVERTER DESIGN FOR RURAL ELECTRIFICATION IN AFGHANISTAN

Prof. Dr. Laila Saidi
Polytechnic University of Kabul, Afghanistan
Assis. Prof. Dr. Mohammad Rahmani
Polytechnic University of Kabul, Afghanistan
Dr. Zainab Nazari
Bamyan University, Afghanistan
Ali Asadi
Kabul University, Afghanistan

Abstract

This research investigates the development of efficient, low-cost power converters designed to improve rural electrification initiatives in Afghanistan. The team presents novel converter topologies with enhanced conversion efficiency, thermal stability, and component minimization, validated through laboratory and field testing. Simulations focus on reliability under poor grid conditions and integration with renewable sources. The paper underscores the importance of local manufacturing capacity, maintenance training, and suitable technical standards. Outcomes suggest that advanced converter systems are foundational to bridging the rural-urban electricity divide, and the study offers policy and development suggestions for sustainable expansion.

Keywords: power converters, Afghanistan, rural electrification, energy efficiency, converter design

WIRELESS COMMUNICATION FRAMEWORKS FOR REMOTE HEALTH MONITORING IN RURAL AFGHANISTAN

Dr. Ahmad Fahim
Bamyan University, Afghanistan
Niloofar Qaderi
Herat University, Afghanistan

Abstract

This paper assesses wireless communication networks for remote health monitoring systems serving isolated Afghan communities. The study designs and evaluates low-power, long-range wireless solutions for data transmission between wearable health sensors and central medical facilities. Field results in several rural districts demonstrate increased patient tracking and timely healthcare responses even in areas lacking reliable grid power and telecommunications. Barriers pertaining to device affordability, network reliability, and digital literacy are discussed alongside feasible strategies for community training and system adaptation. The research concludes with recommendations for health ministries and NGOs seeking scalable, cost-effective digital health frameworks in resource-limited settings.

Keywords: wireless communication, rural health, Afghanistan, telemedicine, wearable sensors

DESIGN AND TESTING OF FAULT-TOLERANT MOTOR DRIVES FOR INDUSTRIAL AUTOMATION

Dr. Fatema Habibi
Herat University, Afghanistan

Abstract

This technical study examines the development, simulation, and prototype testing of fault-tolerant motor drive systems intended for industrial automation applications in Afghan manufacturing. Emphasis is placed on redundancy strategies, real-time diagnostics, and hardware-software integration to maintain continuous operation despite component failures. Results from laboratory tests and pilot factory installations illustrate increased uptime, operational safety, and resource optimization. The study indicates that the adoption of robust drive designs can play a key role in modernizing Afghanistan's industrial sector. The paper synthesizes lessons for engineers and policy planners engaging in automation under economic and infrastructural constraints.

Keywords: fault-tolerant drives, Afghanistan, industrial automation, motor control, reliability

**AI-POWERED IMAGE RECOGNITION TECHNOLOGIES FOR CIVIL
INFRASTRUCTURE MONITORING IN KABUL**

Assis. Prof. Dr. Amir Rezai
Kabul Polytechnic University, Afghanistan

Dr. Haroon Hussaini
Kabul Polytechnic University, Afghanistan

Maryam Ali
Bamyan University, Afghanistan

Omid Najafi
Herat University, Afghanistan

Abstract

Focusing on the urban context of Kabul, this research explores the application of artificial intelligence-based image recognition systems for the non-invasive monitoring of civil infrastructure such as bridges, roads, and public buildings. Through case studies and field pilots, the authors evaluate the accuracy, speed, and scalability of deep learning algorithms deployed on drones and fixed cameras to detect structural anomalies, cracks, or aging. The integration of these technologies in city-wide data management platforms is discussed, along with local requirements regarding data privacy and infrastructure maintenance. Findings suggest that AI-powered monitoring can enhance preventive maintenance efforts, reduce costs, and support safer urban environments.

Keywords: image recognition, AI, infrastructure monitoring, Afghanistan, civil engineering

EVALUATING THE IMPACT OF HEALTH EDUCATION PROGRAMS ON DIABETES PREVENTION IN IRANIAN COMMUNITIES

Prof. Dr. Shirin Jafari
Tehran University of Medical Sciences, Iran

Dr. Nima Ebrahimi
Tehran University of Medical Sciences, Iran

Assis. Prof. Dr. Laleh Moradi
Tehran University of Medical Sciences, Iran

Abstract

This study examines the effectiveness of health education initiatives designed to prevent diabetes within diverse Iranian communities. Through a mixed-methods approach combining surveys, focus groups, and pre- and post-program health screenings, the research explores changes in public awareness, lifestyle choices, and clinical markers such as blood glucose and BMI. Results demonstrate significant improvements in dietary habits, physical activity, and diabetes-related knowledge among participants in both urban and rural regions. The paper addresses challenges such as health literacy gaps and socio-economic disparities that affect program reach and efficacy. Cultural tailoring of educational materials and community engagement are shown to enhance participation and retention. The analysis recommends expanding health education programs with ongoing monitoring and policy support, highlighting the significance of early intervention and preventive care in reducing national diabetes burden.

Keywords: diabetes prevention, health education, Iran, community health, chronic disease

**GENETIC SCREENING AND COUNSELING FOR HEREDITARY CANCERS:
PRACTICES AND CHALLENGES IN IRAN**

Assis. Prof. Dr. Roya Behzad
Isfahan University of Medical Sciences, Iran

Dr. Navid Parsa
Isfahan University of Medical Sciences, Iran

Abstract

This research investigates the current landscape of genetic screening and counseling for hereditary cancers in Iran, focusing on breast, ovarian, and colorectal cancers. Using hospital records, provider interviews, and patient surveys, the study evaluates the accessibility, uptake, and impact of genetic services. Barriers identified include limited genetic literacy, shortage of trained counselors, and social stigma surrounding hereditary risk. The findings highlight the potential of genetic interventions to reduce cancer morbidity through early detection, but emphasize the necessity for public education campaigns, integration of services into primary care, and the establishment of ethical guidelines. The conclusion emphasizes collaborative efforts between medical, governmental, and community organizations in advancing effective and equitable cancer prevention strategies nationwide.

Keywords: genetic screening, hereditary cancer, counseling, Iran, public health

STRENGTHENING MATERNAL HEALTHCARE ACCESS IN LOW-RESOURCE NIGERIAN SETTINGS

Prof. Dr. Olufunmilayo Adeyemi
University of Ibadan, Nigeria

Dr. Jamila Musa
University of Ibadan, Nigeria

Assis. Prof. Dr. Chinedu Okeke
University of Ibadan, Nigeria

Ngozi Chukwu
University of Ibadan, Nigeria

Abstract

This comprehensive study explores barriers and facilitators to maternal healthcare access in low-resource Nigerian communities. By conducting community surveys, interviews with healthcare providers, and descriptive statistical analysis, the research identifies key factors affecting antenatal attendance, skilled birth delivery, and postpartum care. The role of cultural practices, infrastructure gaps, financial constraints, and social support networks are assessed. Interventions such as mobile clinics, community health workers, and public awareness programs are evaluated for effectiveness. Notably, outreach and health education were shown to improve service utilization and maternal outcomes. The research advocates for multi-sectoral approaches, policy reforms, and increased investment in rural health infrastructure to achieve sustainable improvement in maternal and child health.

Keywords: maternal health, healthcare access, Nigeria, rural communities, public health intervention

BURDEN OF MALARIA AND COMMUNITY RESPONSES TO VECTOR CONTROL IN RURAL NIGERIA

Dr. Adedayo Ogunleye
Obafemi Awolowo University, Nigeria

Assis. Prof. Dr. Funke Adebayo
Obafemi Awolowo University, Nigeria

Abstract

This research evaluates the ongoing burden of malaria in rural Nigerian communities and analyzes responses to vector control interventions such as insecticide-treated nets (ITNs) and indoor residual spraying. Quantitative data from field surveys and qualitative interviews with residents and health workers reveal the persistence of malaria incidence, despite wide distribution of ITNs. Challenges are linked to net usage compliance, perception of side effects, and seasonal migration patterns. The study identifies the importance of sustained education efforts and adaptive distribution strategies that align with community norms. Recommendations include integrating vector control with local health promotion campaigns and engaging community leaders to improve participation. The conclusion stresses the need for innovative, context-sensitive solutions to achieve lasting reductions in malaria prevalence.

Keywords: malaria, vector control, Nigeria, rural health, disease prevention

REFORMING MEDICAL EDUCATION IN ALBANIA: COMPETENCY-BASED CURRICULA AND TEACHING STRATEGIES

Prof. Dr. Arben Leka
University of Tirana, Albania

Dr. Elda Nuri
University of Tirana, Albania

Blendi Sorra
University of Tirana, Albania

Assis. Prof. Dr. Lira Hysa
University of Tirana, Albania

Abstract

This article analyzes efforts to reform medical education in Albania through competency-based curricula and innovative teaching strategies. The research utilizes curriculum content analysis, faculty workshops, and assessment of student performance indicators to evaluate outcomes. Advances include problem-based learning modules, clinical simulation, and inter-professional education. Barriers remain in resource allocation, instructor training, and alignment with European standards. Student feedback indicates improved confidence and critical thinking skills. The evidence suggests that such reforms are vital for aligning medical training with health system priorities and EU integration processes. Policy recommendations focus on faculty development, resource investment, and continuous curricular review to sustain progress.

Keywords: medical education, Albania, competency-based curriculum, educational reform, teaching innovation

CHALLENGES IN IMPLEMENTING ELECTRONIC HEALTH RECORDS (EHR) SYSTEMS IN ALBANIAN HOSPITALS

Assis. Prof. Dr. Jona Dervishi
University of Medicine, Tirana, Albania

Dr. Renis Tashi
University of Medicine, Tirana, Albania

Abstract

This study assesses the challenges and opportunities associated with electronic health records (EHR) implementation in Albania's hospital sector. Through interviews with IT staff, clinicians, and administrators, findings highlight barriers such as insufficient digital infrastructure, resistance to change, staff training needs, and data privacy issues. Comparative analysis with neighboring countries offers insights into best practices and scalable implementation. Successful pilot programs demonstrate improved data accessibility and patient care coordination but underline the necessity for nationwide training and robust cybersecurity protocols. The research concludes with recommendations for a phased approach to EHR adoption, governmental support, and greater user engagement.

Keywords: electronic health record, Albania, health informatics, hospital management, digital transformation

**PREVALENCE OF CARDIOVASCULAR RISK FACTORS AMONG
UNIVERSITIES' STUDENTS IN MONGOLIA**

Prof. Dr. Bat-Erdene Batbayar
National University of Medical Sciences, Mongolia

Dr. Oyun-Erdene Tungalag
Mongolian University of Science and Technology, Mongolia

Erdenebat Naranbaatar
National University of Medical Sciences, Mongolia

Abstract

This cross-sectional study assesses the prevalence and determinants of cardiovascular risk factors—hypertension, obesity, smoking, and physical inactivity—among university students in Mongolia. Using biometric screenings, questionnaires, and lifestyle assessments from several universities, the study reports growing rates of obesity and hypertension, especially in urban campuses. Gender, socioeconomic background, and dietary patterns emerge as significant determinants. The findings highlight the urgent need for preventive campus health programs, routine screenings, and student-centered interventions. Policy implications include incorporating cardiovascular health education in university curricula and enhancing university health services to address modifiable risk factors.

Keywords: cardiovascular risk, Mongolia, university students, obesity, prevention

SUSTAINABLE OLIVE CULTIVATION PRACTICES AND THEIR IMPACT ON SOIL HEALTH IN TUNISIA

Prof. Dr. Nabil Ben Youssef
University of Carthage, Tunisia
Dr. Hela Amari
University of Sfax, Tunisia

Abstract

This research addresses the sustainability challenges and solutions related to olive cultivation in Tunisia, a country recognized as one of the world leaders in olive oil production. Employing a mixed-methods approach that includes field experiments, soil analyses, and farmer interviews, the study evaluates how various agronomic practices influence soil health over multiple seasons. Among the key practices investigated are organic amendment use, cover cropping, conservative irrigation, and crop rotation. The results demonstrate that adopting soil-friendly methods not only increases olive yield but also improves soil organic matter levels, microbial activity, and water retention. These practices mitigate erosion and reduce dependence on chemical fertilizers, supporting a shift toward more ecological agriculture. Farmer adoption rates are analyzed in the context of economic incentives and governmental support. The findings underscore the importance of policy initiatives that promote knowledge transfer and sustainable techniques, ensuring long-term productivity and resource conservation in Tunisia's crucial olive sector.

Keywords: sustainable agriculture, olive cultivation, soil health, Tunisia, agroecology

WATER MANAGEMENT STRATEGIES FOR IRRIGATED AGRICULTURE IN SEMI-ARID TUNISIAN REGIONS

Dr. Yasmine Belkadhi
University of Tunis El Manar, Tunisia

Abstract

This paper explores innovative water management approaches applied in irrigated farming systems in semi-arid areas of Tunisia. Through case studies of wheat, tomato, and date palm operations, the study assesses the effectiveness of drip irrigation, deficit irrigation, and rainwater harvesting in enhancing water use efficiency. The research employs remote sensing, in-situ sensors, and GIS mapping to evaluate water allocation and crop performance. Findings reveal that integrating modern irrigation technologies with traditional water-saving techniques substantially increases water productivity and crop yields while preventing soil salinization. Barriers to adoption include infrastructure costs, farmer training needs, and fluctuating water policy frameworks. Policy recommendations focus on enhanced support for extension services, investment in water infrastructure, and farmer co-operatives to foster resilient, water-efficient agriculture in Tunisia's most vulnerable regions.

Keywords: water management, irrigation, semi-arid agriculture, Tunisia, resource efficiency

IMPROVING SORGHUM YIELD THROUGH GENETIC DIVERSITY AND AGROECOLOGICAL PRACTICES IN ETHIOPIA

Prof. Dr. Amare Getahun
Addis Ababa University, Ethiopia
Dr. Hana Tsegaye
Jimma University, Ethiopia
Assis. Prof. Dr. Bekele Alemu
Haramaya University, Ethiopia

Abstract

This work investigates how exploiting genetic diversity within sorghum varieties, in tandem with agroecological farming practices, can increase yields and resilience for smallholder farmers in Ethiopia. Field trials across multiple agroecological zones compare indigenous landraces with improved hybrids, focusing on key agronomic, pest resistance, and drought tolerance traits. Participatory evaluations with farming communities enrich the dataset, while laboratory analysis reveals genetic markers linked with superior performance. The research further evaluates crop rotation, intercropping, and organic matter management as yield-boosting and risk-reducing strategies. Results show that a blend of local knowledge, varietal diversity, and ecological practice supports productivity, adaptation to climate extremes, and long-term food security. The findings advocate for research-driven agricultural extension and policy strategies that protect and harness on-farm genetic resources across Ethiopia's diverse cropping systems.

Keywords: sorghum, genetic diversity, agroecology, Ethiopia, smallholder agriculture

INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND BIOPESTICIDES IN ETHIOPIAN HORTICULTURE

Dr. Sosina Abebe

Hawassa University, Ethiopia

Mulu Worku

Mekelle University, Ethiopia

Abstract

This paper analyzes the current trends, successes, and challenges of integrated pest management (IPM) in Ethiopia's rapidly modernizing horticultural sector. Data are drawn from large-scale greenhouse and open-field production of tomatoes, green beans, and flowers. The study tests biopesticide efficacy and insectary-reared natural enemies versus conventional chemical pesticides. Results indicate that, when paired with cultural and physical control methods, biopesticides can significantly reduce pest infestations while lowering environmental and health risks. The research highlights bottlenecks such as cost, knowledge gaps, and regulatory complexity in biopesticide registration and adoption. Recommendations center on fostering public-private partnerships, farmer cooperatives, and targeted training to mainstream IPM. The authors argue that a robust IPM approach, customized for local crops and pests, is vital for sustainable and globally competitive horticulture in Ethiopia.

Keywords: integrated pest management, biopesticides, horticulture, Ethiopia, sustainable agriculture

PRECISION AGRICULTURE APPLICATIONS IN WINTER WHEAT PRODUCTION IN RUSSIA

Dr. Nikolai Petrov
Lomonosov Moscow State University, Russia
Assoc. Prof. Dr. Svetlana Ivanova
Kuban State Agrarian University, Russia

Abstract

This study presents the implementation and impact of precision agriculture technologies, such as GPS-guided machinery, variable rate fertilization, and unmanned aerial vehicles, in winter wheat fields across southern Russia. Extensive field trials and yield monitoring reveal considerable increases in nutrient use efficiency, reduced input costs, and improved yields. Soil sampling, remote sensing, and big data analytics enable site-specific management, which reduces environmental impact and enhances sustainability. Barriers to large-scale adoption are discussed, including initial investment requirements, the need for technical expertise, and farm size. The authors recommend government-backed incentives and university-led demonstration farms to accelerate adoption. Broader implications suggest that precision agriculture is set to reshape Russian grain production toward greater productivity and environmental stewardship, with potential lessons for global cereal systems.

Keywords: precision agriculture, winter wheat, Russia, technology adoption, site-specific farming

**RUSSIAN GRASSLAND MANAGEMENT: CONSERVATION, CARBON
SEQUESTRATION, AND LIVESTOCK PRODUCTIVITY**

Prof. Dr. Olga Smirnova
Saint Petersburg State University, Russia
Dr. Aleksandr Vasiliev
Novosibirsk State University, Russia
Ivan Kovalev
Saint Petersburg State University, Russia

Abstract

Examining Russia's vast grasslands, this research evaluates strategies for balancing conservation, carbon sequestration, and livestock productivity. The study combines ecological field surveys, livestock performance trials, and carbon stock measurements across steppe and meadow biomes. Rotational grazing and native species reintroduction are assessed alongside economic incentives for sustainable management. Results highlight the significant potential of well-managed grasslands in supporting biodiversity, increasing soil carbon, and boosting animal yields, while preventing overgrazing and degradation. The paper addresses policy gaps, stakeholder conflicts, and necessary government interventions to align conservation and economic goals. The conclusions offer a framework for large-scale, sustainable grassland management relevant throughout temperate Eurasia and focus on integrating ecological services in agricultural policy making.

Keywords: grassland management, Russia, conservation, carbon sequestration, livestock productivity

MODERN DESERT FARMING TECHNIQUES IN THE ARABIAN PENINSULA: CHALLENGES AND PROSPECTS

Prof. Dr. Maha Al-Zahrani

King Saud University, Saudi Arabia

Dr. Omar Al-Barakati

United Arab Emirates University, United Arab Emirates

Assis. Prof. Dr. Waleed Al-Yousef

Qatar University, Qatar

Nasser Al-Farsi

Sultan Qaboos University, Oman

Abstract

This paper examines the recent advancements and persistent difficulties in developing sustainable agriculture within the desert landscapes of the Arabian Peninsula. The research outlines the application of hydroponics, drip irrigation, controlled-environment agriculture, and salt-tolerant crops in countering water scarcity and poor soil fertility. Multi-site case studies provide insights into cost-benefit analyses, ecological impacts, and scalability for commercial production. Collaboration between regional universities and governmental agencies is found to play a crucial role in technology transfer and farmer training. However, obstacles remain in ensuring water use efficiency, system maintenance, and access to green technology for smallholder farmers. Policy implications highlight the need for targeted subsidies, integrated resource management, and long-term scientific innovation to secure food production in this arid region.

Keywords: desert farming, Arabian Peninsula, hydroponics, water conservation, sustainable agriculture

RECLAIMING MARGINAL LANDS FOR AGRICULTURE IN ARID REGIONS OF THE ARAB WORLD

Dr. Hanan Al-Salem
Kuwait University, Kuwait
Prof. Dr. Saeed Al-Harbi
King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia

Abstract

This research investigates strategies and practical outcomes of restoring degraded, saline, or sandy lands to productive agriculture across the Arab world's arid zones. Field trials and laboratory analyses evaluate amendments such as gypsum, organic compost, and biochar for soil improvement and the establishment of drought- and salt-tolerant crops. Socioeconomic data illustrate successful farmer participation and increased food security, but also document barriers like access to materials and technical know-how. Environmental benefits, including erosion control and carbon capture, are detailed. The study argues that interdisciplinary initiatives backed by robust policy support can scale up land reclamation to meet future food demand, with regional partnerships vital for spreading practical knowledge and research advances.

Keywords: land reclamation, arid regions, saline soils, Arab world, sustainable agriculture

**DEVELOPMENT AND PHARMACOKINETIC EVALUATION OF HERBAL
ANTIOXIDANT FORMULATIONS FOR CHRONIC DISEASE MANAGEMENT**

Prof. Dr. Lamia Bensalem
University of Algiers, Algeria

Dr. Karim Djeghlal
University of Algiers, Algeria

Abstract

This research investigates the formulation and pharmacokinetic characterization of herbal antioxidant products intended for chronic disease management, with a focus on bioavailability improvements and safety profiling. Using extracts from indigenous Algerian medicinal plants, both standardized and novel semi-synthetic preparations were developed and assessed through in vitro assays and in vivo animal studies. Key outcome measures included absorption rate, tissue distribution, metabolic stability, and potential hepatic or renal toxicity. Results demonstrated that optimized formulations significantly improved antioxidant activity, slowing the progression of oxidative stress markers in chronic pathologies. The study revealed variability in pharmacokinetic profiles based on both the extraction method and excipient composition. Clinical translation was evaluated through initial human safety trials, which indicated good tolerability and the potential for integration into multi-modal chronic disease therapy. The findings underscore the relevance of local botanical resources in pharmaceutical innovation and highlight the need for further large-scale clinical assessments to validate long-term efficacy and safety in diverse patient populations.

Keywords: herbal medicine, pharmacokinetics, antioxidants, chronic disease, Algeria

CURRENT CHALLENGES IN ANTIMICROBIAL STEWARDSHIP PROGRAMS IN ALGERIAN HOSPITAL PHARMACY PRACTICE

Assis. Prof. Dr. Nesrine Toumi
University of Oran 1 Ahmed Ben Bella, Algeria

Dr. Ilyes Bendaoud
University of Oran 1 Ahmed Ben Bella, Algeria

Abstract

This comprehensive review analyzes the effectiveness and implementation problems of antimicrobial stewardship programs (ASP) across hospital pharmacies in Algeria. Data was collected through structured interviews with pharmacy staff, audits of prescription protocols, and evaluation of resistance trend reports from various teaching hospitals. Findings revealed multiple barriers, including insufficient staff training, lack of protocol standardization, communication gaps between pharmacists and prescribers, and limited integration of clinical decision-support systems. The study also explores the consequences of high empirical antibiotic use and the challenges presented by multi-drug resistant organisms. Key recommendations involve strengthening interprofessional education, upgrading information technologies in pharmacies, and establishing national guidelines tailored for the Algerian clinical context. This work highlights the essential role of hospital pharmacists in ASP leadership to reduce inappropriate antibiotic usage and curb resistance rates while safeguarding patient safety.

Keywords: antimicrobial stewardship, hospital pharmacy, antibiotics, resistance, Algeria

NICOTINE ADDICTION AND PHARMACOLOGICAL INTERVENTIONS AMONG SYRIAN YOUTH: A CROSS-SECTIONAL STUDY

Prof. Dr. Nour Al-Shami
Damascus University, Syria

Dr. Bassel Haddad
Damascus University, Syria

Dr. Lina Mansour
Aleppo University, Syria

Abstract

This cross-sectional study examines the prevalence of nicotine addiction among Syrian adolescents and the evaluation of available pharmacological interventions in supporting smoking cessation. The researchers conducted structured interviews with over 600 students from urban and rural schools and analyzed cessation rates through follow-up at community health centers. Pharmacotherapies investigated included nicotine replacement therapy, bupropion, and varenicline. Results indicated that while pharmacological interventions improved cessation attempts slightly over behavioral counseling alone, accessibility and social stigma limited comprehensive adoption. The report underscores gaps in public awareness, cultural resistance, and availability of medications in war-affected regions. The authors propose the establishment of integrated school- and pharmacy-based intervention programs and community campaigns to promote early intervention and standardize cessation protocols across Syria.

Keywords: nicotine addiction, pharmacological interventions, adolescents, cessation, Syria

EVALUATION OF TRADITIONAL HERBAL DRUG USE IN PHARMACEUTICAL PRACTICE IN SYRIA

Assis. Prof. Dr. Hani Nasr
Tishreen University, Syria

Amina Qabbani
Tishreen University, Syria

Abstract

This research investigates the widespread use and pharmaceutical integration of traditional herbal remedies in Syria's current health landscape. By combining patient surveys at major community pharmacies with interviews of practicing pharmacists, the study documents the types of herbal medicines dispensed, usage trends, and drug-herb interaction awareness. Findings revealed notable reliance on remedies for digestive and respiratory complaints, but a lack of comprehensive regulatory oversight and variability in product quality. Interviews highlighted both opportunities — such as patient trust and cultural acceptance — and risks, including inconsistent counseling and limited scientific validation of efficacy and safety. Recommendations call for regulatory updates, creation of a national herbal pharmacopeia, and pharmacist education programs in phytotherapy and risk communication.

Keywords: herbal medicine, pharmaceutical practice, traditional remedies, Syria

CLINICAL OUTCOMES OF MULTI-DRUG THERAPY FOR TUBERCULOSIS PATIENTS IN SENEGAL: A PHARMACY-BASED COHORT STUDY

Dr. Aissatou Faye
Cheikh Anta Diop University, Senegal

Moussa Ndiaye
Cheikh Anta Diop University, Senegal

Prof. Dr. Alioune Diop
University of Thies, Senegal

Abstract

This cohort study investigates the effectiveness of multi-drug therapy for tuberculosis (TB) patients managed through pharmacy-led initiatives in urban and rural sites across Senegal. The research collected longitudinal data on drug adherence, adverse event reporting, and treatment outcomes. Results indicated high levels of treatment completion where pharmacists implemented adherence counseling, outreach education, and medication management systems. However, barriers included intermittent drug supply, transportation limitations, and patient socioeconomic status. Statistical analysis revealed that enhanced pharmacy involvement significantly reduced default rates and improved cure rates compared to standard care. The study underscores the importance of integrating pharmacists in TB management and advocates for expanded pharmacist-led education and adherence programs as part of national TB policy in low-resource settings.

Keywords: tuberculosis, multi-drug therapy, pharmacy practice, treatment outcomes, Senegal

PHARMACOVIGILANCE AND ADVERSE DRUG REACTION REPORTING SYSTEMS IN SENEGALESE HOSPITALS

Prof. Dr. Marième Diouf
University of Bamako, Senegal

Assis. Prof. Dr. Serigne Gueye
Cheikh Anta Diop University, Senegal

Fatoumata Sarr
Cheikh Anta Diop University, Senegal

Dr. Abdoulaye Diallo
University of Saint-Louis, Senegal

Abstract

This study analyzes the effectiveness and limitations of pharmacovigilance systems and adverse drug reaction (ADR) reporting in major Senegalese hospitals. Through surveys with pharmacists, reviews of ADR records, and focus groups with hospital administrators, the research highlights under-reporting, limited awareness, and lack of digital infrastructure as key barriers to effective pharmacovigilance. The implementation of electronic reporting tools and educational interventions improved ADR notification and monitoring rates, but resource gaps and staff shortages hindered sustainability and nationwide rollout. The authors recommend further investment in training, inter-hospital data sharing, and adaptive policies for context-specific challenges. These approaches are essential to optimizing patient safety and medication efficacy in Senegal's evolving healthcare system.

Keywords: pharmacovigilance, adverse drug reactions, reporting systems, hospital pharmacy, Senegal

EVALUATION OF PHARMACOGENOMIC TESTING PRACTICES IN AZERBAIJANI COMMUNITY PHARMACIES

Prof. Dr. Leyla Abbasova
Azerbaijan Medical University, Azerbaijan

Dr. Kamran Akhundov
Azerbaijan Medical University, Azerbaijan

Dr. Arzu Guliyeva
Khazar University, Azerbaijan

Abstract

This paper explores the current status and effectiveness of pharmacogenomic testing services in community pharmacies across Azerbaijan. Semi-structured interviews and survey data from pharmacists and patients were used to assess the extent of pharmacogenomic testing integration, patient counseling quality, and clinical utility. While the availability of pharmacogenomic services increased, constraints including variable training, limited test reimbursement, and inconsistent physician-pharmacist collaboration were identified. Case studies show that tailored drug therapy based on genetic profiling led to improved outcomes in cardiovascular and psychiatric medication regimens. However, robust policy guidelines and interdisciplinary training are needed to support safe, standardized implementation at scale.

Keywords: pharmacogenomics, community pharmacy, personalized medicine, Azerbaijan

PARASITIC INFESTATIONS IN SMALL RUMINANTS: CHALLENGES FOR RURAL LIVESTOCK FARMERS IN TAJIKISTAN

Shodmon Mirzoev
Tajik National University, Tajikistan

Dr. Farzona Rajabova
Tajik National University, Tajikistan

Jamila Saidova
Tajik National University, Tajikistan

Abstract

A major obstacle to sustainable small ruminant farming in Tajikistan is the prevalence of parasitic infestations, particularly gastrointestinal nematodes and ectoparasites. This paper reports findings from a cross-sectional survey of over 800 sheep and goats in three provinces, utilizing fecal examination, blood sampling, and external parasite identification. The most frequent infestations included *Haemonchus contortus* and tick species responsible for significant morbidity and production loss. Interviews with farmers revealed gaps in parasite management, limited knowledge of anthelmintic resistance, and cultural adherence to traditional treatment methods. Statistical analysis showed clear associations between poor husbandry, irregular deworming, and high infection rates. The study examined educational outreach by extension services and efficacy of locally available antiparasitic drugs. Improved farmer training, rotation grazing, and integrated parasite control are advocated. Emphasis is placed on building partnerships between universities and local agencies, ensuring cost-effective strategies and sustainable improvements in animal health and productivity.

Keywords: small ruminants, parasites, Tajikistan, animal husbandry, extension education

