

CONFERENCE BOOK



ÇANAKKALE
17 - 19 TEMMUZ 2026

TROIA

4. ULUSLARARASI FEN ve UYGULAMALI BİLİMLER KONGRESİ



TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES
JULY 17 – 19, 2026
ÇANAKKALE

ISBN: 978-625-8795-31-8

Published by : Academy Global Publishing House





**TROIA 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES
JULY 17 – 19, 2026
CANAKKALE**

Edited By
ASSOC. PROF. DR. BÜLENT IŞIK

Issued: 20.08.2026
ISBN: 978-625-8795-31-8

ASSOCIATION & ACADEMIC INCENTIVES :

**In the conference 26 papers have been presented by Turkish participants and 39 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.

CONFERENCE ID

TROIA 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES**DATE – PLACE****JULY 17 – 19, 2026****CANAKKALE****ORGANIZATION****ACADEMY GLOBAL CONFERENCES & JOURNALS****EVALUATION PROCESS****All applications have undergone a double-blind peer review process.****PARTICIPATING COUNTRIES**

Turkey – Oman- Singapore- Palestine- Kyrgyzstan- Eritrea- Yemen- Nigeria- Ghana- Mexico-
Spain- Pakistan- Iran- South Korea- Kenya -

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 : Assoc. Prof. Dr. Mehmet Fırat Baran

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

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. Nazile Abdullazade - Azerbaijan Devlet Pedagoji Üniversitesi

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. Həmzə 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 Atak - Dicle Üniversitesi

Lecturer Mehmet Nuri Ödük - Selçuk Üniversitesi

Dr. Fatih İ. Kurşunmaden - 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. Al-Rashiff Hamjilani Mastul – Philipinnes

Prof. Dr. Alhisan U. Jemsy – Philippines

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. Sevrâ Fırıncıoğulları - 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. Həmzə Əliyev - Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Okan Sarıgöz – Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Eda Bozkurt – 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

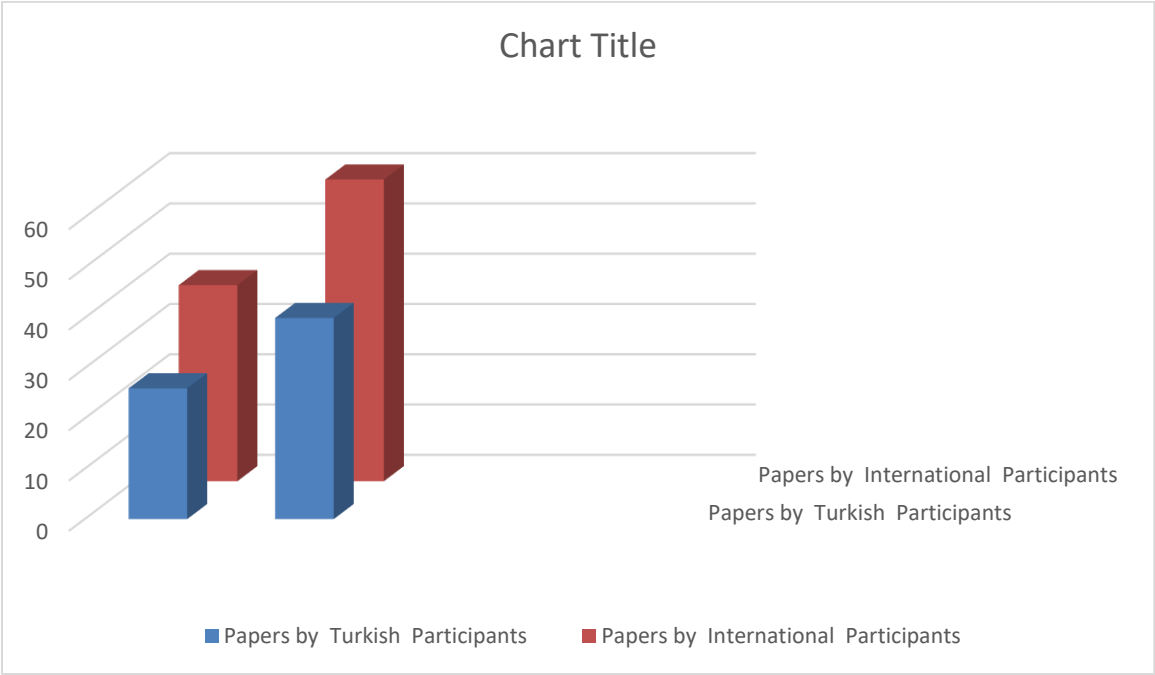
Assoc. Prof. Dr. Sandeep Gupta – India

Assoc. Prof. Dr. Veysel Parlak – Türkiye

- Assoc. Prof. Dr. Mahmut İslamoğlu – Türkiye
- Assoc. Prof. Dr. Nazile Abdullazade – Azerbaijan
- Assoc. Prof. Dr. Irade 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
- Assist. Prof. K. R. Padma – India
- Assist. Prof. Dr. Omid Afghan - 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 – Iran
- 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 Tursunalieva - 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. Fatih İ. Kurşunmaden – Türkiye
- Dr. Mehmet Nuri Ödük – Türkiye
- Dr. Ayşe Baran - Türkiye
- 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>	26	40
<i>Papers by International Participants</i> <i>(14 Countries)</i>	39	60





TROIA 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES
JULY 17 – 19, 2026
CANAKKALE

NO : **AC- 4C - 2026. 352A– 3857**

Konu : Akademik Teşvik Uygunluk Belgesi

10/08/2026

İLGİLİ MAKAMA

Academy Global Conferences tarafından düzenlenen **TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES** kongresi 17-19 Temmuz 2026 tarihlerinde Çanakkale’de 15 farklı ülkeden akademisyenin katılımıyla gerçekleştirilmiştir. Kongre kapsamında sunulan 65 bildirinin 26’sı Türkiye’den, 39’u ise farklı 14 ülkeden katılan akademisyenler tarafından sunulmuştur. Kongre, 16 Ocak 2020 Akademik Teşvik Ödeneği Yönetmeliğine getirilen “Tebliğlerin sunulduğu yurt içinde veya yurt dışındaki etkinliğin uluslararası olarak nitelendirilebilmesi için Türkiye dışında en az beş farklı ülkeden sözlü tebliğ sunan konuşmacının katılım sağlaması ve tebliğlerin yarıdan fazlasının Türkiye dışından katılımcılar tarafından sunulması esastır.” değişikliğine uygun olarak düzenlenmiştir.

Bilgilerinize arz ederiz

Saygılarımızla

Assis. Prof. Dr. Gültekin Gürçay



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.



TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES
TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES
TROIA 4TH INTERNATIONAL GROUP EXHIBITION
July 17 – 19, 2026
CANAKKALE

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 söz konusu 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,

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224				
17 Temmuz / July 17, 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	Dr. Amaneh Manafidizaji	1	DEVELOPMENT OF A NEW GENERATION SUMP FILTER DESIGN AND INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT MESH SIZES ON DISHWASHER WASHING PERFORMANCE	E&P Laboratuvarı Test Uzmanı, Onur TURHAN
		2	ATIK CAM TOZU VE CEVİZ KABUĞU TOZU KATKILI GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİPROPİLEN KOMPOZİTLERİN SU ABSORPLAMASININ SERTLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ	Doç. Dr. İlyas Kartal Aslıhan Aşar
		3	ATIK CAM VE FINDIK KABUĞU DOLGULU VİNİLESTER ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ	Edanur GÜRBÜZ Doç. Dr. İlyas KARTAL
		4	O-RİNG KANALI ÇAPININ O-RİNG ÇAPINA OLAN ORANININ SIZDIRMAZLIK PERFORMANSINA ETKİSİ	Mak. Müh, Berkay Mendi
		5	EXPERİMENTAL İNVESTİGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT MESH CONFIGURATIONS ON THE ADHESION STRENGTH BETWEEN GEOPOLYMER CONCRETE AND REINFORCEMENT.	Doç. Dr. Barış BAYRAK
		6	NEVŞEHİR POMZA AGREGASI İLE ÜRETİLEN LİFLİ HAFİF HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ	İnş. Müh. Aminehatun TEZCAN Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY
		7	POMZA AGREGALI HAFİF HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİNE MİKRONİZE BAZALT VE DERE KUMU DOLGU MALZEMELERİNİN ETKİSİ	İnş. Müh. Esin Eytül ÇELİK Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN
		8	NAOH İLE ALKALİ YIKAMA ÖN MUAMELESİNİN MALKARA VE SİBİRYA KÖMÜRLERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞINA ETKİSİ	İsmail Ekrem KÜTÜKCÜLER Prof. Dr. Mustafa ÇINAR

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224				
17 Temmuz / July 17, 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	Prof. Dr. Sevgi MARAKLI	1	FORMULATION DEVELOPMENT AND SAFETY CHARACTERIZATION OF A NATURAL BOTANICAL HAIR CARE OIL	Öğr. Gör. Dr. Sibel DİKMEN KÜÇÜK
		2	FUSARIUM GRAMINEARUM'A KARŞI ÇEŞİTLİ ANTİFUNGALLERİN İN VİTRO ETKİNLİK DEĞERLENDİRMESİ	Araştırma Görevlisi, Özlem SEFER Profesör Doktor, Sevgi MARAKLI
		3	PLEUROTUS A VE PLEUROTUS B MEMBRAN SALDIRI KOMPLEKSİ/PERFORİN-BENZERİ PROTEİNLERİNİN MOLEKÜLER KLONLANMASI	MSc. Kübra ERGÜN Araş. Gör. Dr. Merve YILMAZER Prof. Dr. Sevgi MARAKLI
		4	EQUISETUM ARVENSE BİTKİSİNDE TANIMLANAN MİRNA'LARIN İNSAN GENOMUNDAKİ POTANSİYEL HEDEF GENLERİNİN BİYOİNFORMATİK ANALİZİ	MSc. Esra Nur GÜLTEKİN Prof. Dr. Sevgi MARAKLI
		5	MAVİ KANTARON'DAN ELDE EDİLEN FRAKSİYONLARIN FİTOKİMYASAL VE SİTOGENETİK ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ	Msc. Dilara DÖRTER Prof. Dr. Sevgi MARAKLI
		6	GÖLLER YÖRESİNDE TOROS GÖKNARININ (ABİES CİLİCİCA) İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ALTINDA GÜNÜMÜZ VE GELECEKTEKİ POTANSİYEL DAĞILIMI	Dr. Seda KAYA KÖSE

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224				
17 Temmuz / July 17, 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	Prof. Dr. Senar AYDIN	1	YENİ ORTAYA ÇIKAN KİRLETİCİLER OLARAK UYUŞTURUCU MADDELER: ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE AKİBET VE ÇEVRESEL RİSK	Prof. Dr. Senar AYDIN Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN
		2	ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE MİKROPLASTİKLERİN AKİBETİ VE ÇEVRESEL RİSKLERİ	Prof. Dr. Senar AYDIN Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN
		3	EXPLAINABLE MACHINE LEARNING FOR CORONARY HEART DISEASE CLASSIFICATION: A NESTED CROSS-VALIDATION STUDY ON THE CLEVELAND DATASET WITH CONSENSUS FEATURE SELECTION AND SHAP INTERPRETATION	Doç. Dr. Şeyma YAŞAR
		4	HANDLING CLASS IMBALANCE IN MEDICAL MACHINE LEARNING: A NARRATIVE REVIEW OF RESAMPLING, ALGORITHMIC, AND EVALUATION STRATEGIES	Doç. Dr. Şeyma YAŞAR
		5	COMPARISON OF HOT AND COLD PRESSED BULK MgB ₂ WITH MAGNESIUM STEARATE ADDITION	Assoc. Prof. Özge ERDEM
		6	STATİK Q AÇISI DİNAMİK İNİŞ MEKANİZMİNİ YANSITIYOR MU?	Dr.Öğr.Üyesi, Burak TAŞ Dr.Öğr.Üyesi, Onur YILDIRIM Arş.Gör.,Şevval ÖZKAN

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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 Ahmet NUR	1	YAPAY ZEKÂ TABANLI GÖRSEL ARAMA VE KİŞİSELLEŞTİRME: TEKNOLOJİ KABUL MODELİ ÇERÇEVESİNDE TRENDYOL DENEYİMİ VE DÜRTÜSEL SATIN ALMA	Öğr. Gör. Şeyda YILDIZ ÇAKIR
		2	A COMPARATIVE EVALUATION OF DEEP LEARNING MODELS FOR SHORT-TERM LOAD FORECASTING IN LOW-VOLTAGE SMART GRIDS	Faruk KÜRKER
		3	ANALYSIS OF THE HARMONIC PERFORMANCE OF PROCESS LOADS AND DISTRIBUTION TRANSFORMERS AT AN EGYPTIAN INDUSTRIAL FACILITY	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR
		4	THE EFFECTS OF COMPENSATION AND UPS OPERATING CONDITIONS AT A CHEMICAL PLANT ON POWER FACTOR AND CURRENT HARMONICS	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR
		5	RÜZGAR VE GÜNEŞ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ İÇİN İZLEME ARAYÜZÜ TASARIMI	Elektrik Elektronik Mühendisliği Öğrencisi, Tuncay Esenel Elektrik Elektronik Mühendisliği Öğrencisi, Eren Mutlu Dr. Öğr. Üyesi, Murat Erhan ÇİMEN
		6	SÜPERKAPASİTÖR UYGULAMALARI İÇİN KARBOKSİMETİL SELÜLOZ(CMC) TABANLI ESNEK ELEKTROTLARDA KURUTMA KOŞULLARININ ELEKTROKİMYASAL PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ	Öğr. Gör. Dr. Selva SERTKAYA Doç. Dr. Ahmet DEMİR

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 2026 / 11:30 – 13:30 Time zone in Turkey (GMT+3)				
Salon	Moderator		Bildiri No ve Başlığı / Paper ID and Title	Authors
HALL / SALON 5	Dr. Roya Ebrahimi,	1	INNOVATIVE TEACHING METHODS TO ENHANCE STUDENT ENGAGEMENT	Altynay Kussainova, Dr. Yerlan Sadykov
		2	THE IMPACT OF DIGITAL TOOLS ON LEARNING OUTCOMES IN HIGHER EDUCATION	Assoc. Prof. Dr. Aigerim Nurgalieva, Didar Zhumabaev
		3	CHALLENGES OF REMOTE EDUCATION AND STRATEGIES FOR IMPROVEMENT	Dr. Roya Ebrahimi, Assis. Prof. Dr. Seyed Karim Hosseini
		4	THE ROLE OF CULTURAL CONTEXT IN CURRICULUM DEVELOPMENT	Leila Mortazavi, Dr. Hamid Reza Balouchi
		5	ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF INCLUSIVE EDUCATION POLICIES IN INDIA	Prof. Dr. Anjali Rajan, Dr. Vikram Singh
		6	TEACHER TRAINING PROGRAMS AND THEIR EFFECT ON CLASSROOM MANAGEMENT	Assoc. Prof. Dr. Priya Menon, Sunil Sharma
		7	THE USE OF PROJECT-BASED LEARNING TO BOOST CRITICAL THINKING SKILLS	Prof. Dr. Nino Gelashvili, Irakli Donadze
		8	IMPROVING STUDENT MOTIVATION THROUGH PERSONALIZED LEARNING PATHWAYS	Assis. Prof. Dr. Mariam Beridze, Giorgi Kvaratskhelia

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Assoc. Prof. Dr. Fatemeh Zare	1	STRATEGIC MANAGEMENT PRACTICES AND THEIR IMPACT ON ORGANIZATIONAL PERFORMANCE	Prof. Dr. Saima Ahmed, Dr. Faraz Khan, Ayesha Malik
		2	THE ROLE OF LEADERSHIP STYLES IN ENHANCING EMPLOYEE MOTIVATION	Assoc. Prof. Dr. Imran Siddiqui, Ali Raza, Dr. Sana Javed
		3	DIGITAL TRANSFORMATION AND ITS EFFECT ON BUSINESS COMPETITIVENESS	Cristina Popescu, Prof. Dr. Andrei Ionescu
		4	SUSTAINABILITY INITIATIVES IN SMALL AND MEDIUM ENTERPRISES: A ROMANIAN PERSPECTIVE	Dr. Elena Georgescu, Assis. Prof. Dr. Mihai Dumitrescu
		5	THE INFLUENCE OF CUSTOMER RELATIONSHIP MANAGEMENT ON SALES GROWTH	Dr. Sara Mohammadi, Prof. Dr. Reza Kazemi
		6	ANALYZING MARKET ENTRY STRATEGIES FOR IRANIAN STARTUPS	Mohammad Rahimi, Assoc. Prof. Dr. Fatemeh Zare
		7	EFFECTS OF CORPORATE GOVERNANCE ON FIRM PERFORMANCE IN EGYPT	Prof. Dr. Ahmed El-Sayed, Dr. Mona Hassan
		8	IMPLEMENTING INNOVATION MANAGEMENT TO DRIVE BUSINESS SUCCESS	Assis. Prof. Dr. Youssef Abdelrahman, Sara Ibrahim

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Dr. Grace Mwangi, Assoc. Prof. Dr. Joseph Ncube	1	GLOBAL BURDEN OF INFECTIOUS DISEASES AND HEALTHCARE RESPONSE IN AFRICA	Prof. Dr. Amina Okoye, Dr. Samuel Tunde, Fatima Diallo
		2	NUTRITION AND CHILDHOOD DISEASE PREVENTION IN SUB-SAHARAN AFRICA	Dr. Grace Mwangi, Assoc. Prof. Dr. Joseph Ncube
		3	HEALTHCARE ACCESSIBILITY AND CHALLENGES IN RURAL KYRGYZSTAN	Assis. Prof. Dr. Aibek Toktogulov, Jamila Omurzakova
		4	MENTAL HEALTH SERVICES DEVELOPMENT IN KYRGYZSTAN: A STRATEGIC OVERVIEW	Prof. Dr. Elmira Karabaeva, Dr. Bakyt Asanaliev, Dinara Ismailova
		5	EPIDEMIOLOGY OF MALARIA IN YEMEN AND PREVENTATIVE MEASURES	Assoc. Prof. Dr. Mahdi Al-Hakim, Dr. Sana Ahmed
		6	MATERNAL AND CHILD HEALTHCARE CHALLENGES IN CONFLICT-AFFECTED AREAS OF YEMEN	Dr. Ahmed Al-Saleh, Wafa Al-Eryani, Prof. Dr. Hanan Khalid
		7	EMERGING PATTERNS IN CHRONIC DISEASES AND PUBLIC HEALTH IN ERITREA	Prof. Dr. Selam Tesfay, Dr. Yohannes Ghebre
		8	VACCINATION UPTAKE AND PUBLIC HEALTH OUTCOMES IN ERITREA	Dr. Meron Habte, Assis. Prof. Dr. Sara Ghebreab, Mesfin Desta
		9	STRATEGIES FOR WATER SANITATION TO REDUCE DISEASES IN ERITREAN COMMUNITIES	Dr. Fikirte Kidane, Dr. Michael Abraham

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Dr. Hyunwoo Park	1	ADVANCES IN BIOACTIVE COMPOUNDS EXTRACTION FROM FUNCTIONAL FOODS	Prof. Dr. Min-Jae Lee, Dr. Su-Yeon Kim
		2	APPLICATION OF NANOTECHNOLOGY IN FOOD PRESERVATION AND SAFETY	Dr. Hyunwoo Park
		3	DEVELOPMENT OF NATURAL FOOD ADDITIVES FROM PLANT EXTRACTS	Assoc. Prof. Dr. Zahra Mohammadi, Fatemeh Hosseini, Reza Karimi
		4	EVALUATION OF PROBIOTIC STRAINS FOR DAIRY PRODUCT ENRICHMENT	Dr. Sara Ahmadi, Milad Farzan
		5	SHELF-LIFE EXTENSION TECHNIQUES FOR PERISHABLE FOOD ITEMS	Prof. Dr. Muhammad Aslam, Dr. Ayesha Khan, Asim Raza
		6	OPTIMIZATION OF ENZYMATIC PROCESSING FOR FOOD TEXTURE IMPROVEMENT	Dr. Nadia Qureshi, Abdul Rehman
		7	IMPACT OF FOOD PACKAGING MATERIALS ON QUALITY AND SAFETY	Dr. Carlos Mendoza, Prof. Dr. Ana Torres, Luis Ramirez, Maria Lopez

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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. José Hernández,	1	ADVANCES IN NANOMATERIALS FOR SUSTAINABLE ENERGY APPLICATIONS	Prof. Dr. Jong-Hoon Kim, Dr. Min-Soo Lee, Seung-Jae Park
		2	OPTIMIZATION OF SMART GRID SYSTEMS USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES	Assoc. Prof. Dr. Eun-Ji Choi, Hee-Won Lim
		3	DESIGN AND ANALYSIS OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS	Dr. Reza Alizadeh, Ali Nazari, Samira Mohammadi
		4	RECENT DEVELOPMENTS IN RENEWABLE ENERGY HARVESTING METHODS	Assis. Prof. Dr. Farhad Mousavi, Dr. Leyla Tabrizi, Nima Shariati, Hamid Rezaei
		5	APPLICATION OF IoT IN INDUSTRIAL AUTOMATION AND CONTROL	Prof. Dr. Muhammad Aslam, Dr. Zara Khan
		6	DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR DEFECT DETECTION IN MANUFACTURING	Asif Malik, Dr. Sana Qureshi, Amna Tariq, Prof. Dr. Kamran Siddiqi Imran Javed
		7	ADVANCED ROBOTICS FOR PRECISION AGRICULTURE	Dr. Carolina Ruiz, Prof. Dr. Enrique Mendoza, Luis Torres
		8	SMART TRANSPORTATION SYSTEMS AND TRAFFIC MANAGEMENT USING AI	Assis. Prof. Dr. Ivan Morales, María Gutierrez
		9		

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Dr. Samuel Okoro,	1	SUSTAINABLE WATER RESOURCE MANAGEMENT IN AFRICAN URBAN AREAS	Dr. Samuel Okoro,
		2	ADVANCES IN WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGIES FOR AFRICAN COMMUNITIES	Kofi Mensah, Dr. Nana Yeboah, Abena Boateng
		3	ASSESSING SOIL REMEDIATION TECHNIQUES IN KYRGYZSTAN'S INDUSTRIAL ZONES	Assoc. Prof. Dr. Aida Sadykova, Ermek Nurtaziev, Bakytbek Osmonov
		4	AIR POLLUTION IMPACTS ON PUBLIC HEALTH IN KYRGYZSTAN URBAN CENTERS	Dr. Gulnara Toktogonova, Assis. Prof. Dr. Mirlan Bektemirov
		5	EVALUATION OF SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEMS IN YEMEN	Faisal Al-Hadhrani
		6	STRATEGIES FOR MITIGATING WATER POLLUTION IN YEMENI AGRICULTURE	Dr. Hana Mohammed, Saeed Al-Saadi, Assoc. Prof. Dr. Lubna Al-Din
		7	MONITORING ENVIRONMENTAL CHANGES USING REMOTE SENSING IN ERITREA	Prof. Dr. Teklemariam Haile, Dawit Gebreselassie, Dr. Selam Kidane

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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. Maha Al-Rashdi	1	MATERNAL HEALTHCARE ACCESS AND SOCIOECONOMIC BARRIERS AMONG WOMEN IN RURAL KYRGYZSTAN	Prof. Dr. Meerim Aitmatova Dr. Bakytgul Uulu
		2	PERCEPTIONS AND PRACTICES OF ANTENATAL NUTRITION AMONG PREGNANT WOMEN IN BISHKEK	Dr. Nurgul Isaeva Zamira Sadykova Gulzat Sultanalieva
		3	PSYCHOSOCIAL STRESSORS AND COPING STRATEGIES AMONG PREGNANT WOMEN IN THE WEST BANK	Assoc. Prof. Dr. Lina Barghouti Dr. Hala Najjar
		4	BARRIERS TO ADEQUATE PRENATAL CARE IN GAZA: PERSPECTIVES OF WOMEN AND HEALTH PROVIDERS	Dr. Abeer Khalil Mohammed Saleh Ayah Abu Seir
		5	IMPACT OF WOMEN'S EDUCATION ON MATERNAL AND INFANT HEALTH OUTCOMES IN SINGAPORE	Dr. Cheryl Tan Liew Wei Ling Prof. Dr. Siti Rahimah Dr. Jasmine Goh
		6	CULTURAL INFLUENCES ON CONTRACEPTIVE USE DECISIONS AMONG SINGAPOREAN WOMEN	Assoc. Prof. Dr. Sharon Lee Samantha Tan
		7	PREGNANCY-RELATED HEALTH LITERACY AND OUTCOMES IN OMANI WOMEN	Assis. Prof. Dr. Maha Al-Rashdi
		8	SOCIAL SUPPORT NETWORKS AND MATERNAL WELL-BEING DURING PREGNANCY IN OMAN	Assis. Prof. Dr. Abdullah Al-Balushi Dr. Salima Al-Yahyaie Huda Al-Shukaili
		9		

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Prof. Dr. Yılmaz KARA	1	THE ROLE OF AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AN ACADEMIC GUIDELINES AND POLICIES: A COMPARATIVE STUDY ON UNIVERSITIES	Dr. Yeliz YAPICIOĞLU AYAZ
		2	USING A SOCIO-SCIENTIFIC DILEMMA INCLUDING JUSTICE VALUE TO DETERMINE THE ARGUMENTATION SKILLS OF SCIENCE TEACHER CANDIDATES	Prof. Dr. Yılmaz KARA
		3	THE IMPACT OF OUT-OF-SCHOOL LEARNING ACTIVITIES ON STUDENT OPINIONS REGARDING TEACHING ABOUT WASTE AND RECYCLING	Prof. Dr. Yılmaz KARA İhsan ÖZCAN
		4	THE RELATIONSHIP BETWEEN THE DEVELOPMENT OF FINE MOTOR SKILLS AND THE REPRESENTATION LEVEL OF HUMAN-FIGURE DRAWINGS AMONG CHILDREN AGED 60-72 MONTHS: A MIXED METHODS STUDY	Doç. Dr. Pınar AKSOY
		5	DEVELOPMENT AND VALIDATION OF THE SOCIAL SUSTAINABILITY PERCEPTION SCALE FOR THIRD- AND FOURTH-GRADE STUDENTS	Assist. Prof. Dr. Ogün ÇAKIR

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Dr. Amaneh Manafidizaji	1	INFERIORITY COMPLEX IN AMY TAN’S THE JOY LUCK CLUB: AN ADLERIAN ANALYSIS OF CHINESE AMERICAN GENERATIONAL CONFLICT	Dr. Öğr. Üyesi Mahmut AKAR Sami BOZKONT
		2	REFLECTIONS OF “STIGMA” IN AYSEL ÖZAKIN’S MIGRANT STORIES	Dr. Öğr. Üyesi, Semra ÖĞRETMEN ASLAN Dr. Öğr. Üyesi, Ali Rıza KILIÇ
		3	HALF MAN: TOPLUMSAL CİNSİYET BASKISI ALTINDA “TAM ERKEKLİĞİN” İMKANSIZLIĞI VE KARDEŞLİĞİN KAÇINILMAZ DÜŞMANLIĞI	Asst. Prof. Dr. Şenay TANRIVERMİŞ
		4	SESSİZ TRAVMALARIN TEMSİLİ: “GÖLGESİNDE” ROMANINDA KARAKTER VE TİPLERİN ÇÖZÜMLENMESİ	Doktora Öğrencisi, Alime UYAR
		5	MUSTAFA AZMİ ÖMER BEY’İN “HANIM KİTABI” IŞIĞINDA GEÇ DÖNEM OSMANLI’DA EV İDARESİ VE GÜNDELİK YAŞAM	Yasemin TÜFEKÇİ Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAVAK

No: 5

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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. Şermin TAĞ KALAFATOĞLU	1	İNSANLIĞIN “MEZARLIĞI”: BATI CEPHESİNDE SAVAŞIN GERÇEK YÜZÜ	Yağmur KARACAOĞLAN Prof. Dr. Mehmet YILMAZ
		2	“PICS OR IT DIDN’T HAPPEN” RETHINKING VISUAL EVIDENCE IN THE DEEPPAKE AGE	Asst. Prof. Mesut YILMAZ
		3	GÖSTERİ TOPLUMUNDA EMEĞİN VE KİMLİĞİN ONTOLOJİK TASFİYESİ: MOON (2009) FİLMİ ÜZERİNE BİR META FETİŞİZMİ OKUMASI	Dr. Öğr. Üyesi SELİM BEYAZYÜZ
		4	FROM CANVAS TO GAME ENGINE: VAN GOGH’S INFLUENCE ON THE DIGITAL GAMING WORLD	Doç. Gülşah ÖZDEMİR
		5	FOLK MUSIC COLLECTIONS IN TURKEY AND TEXTUAL LIMITATIONS	Dr. Öğr. Üyesi, Uğur DOĞAN
		6	CLASS, ALIENATION, AND THE TRANSFORMATION OF THE CAPITALIST FIGURE IN THE 2005 AND 2023 FILM ADAPTATIONS OF CHARLIE AND THE CHOCOLATE FACTORY	Prof. Dr. Şermin TAĞ KALAFATOĞLU
		7	FROM ANTI-CONSUMERISM TO COMMERCIAL CINEMA: THE TRANSFORMATION OF CONSUMPTION IDEOLOGY IN THE 1971 ADAPTATION OF CHARLIE AND THE CHOCOLATE FACTORY	Prof. Dr. Şermin TAĞ KALAFATOĞLU
		8	“BENDEN BU KADAR” FİLMİNİN TAKINTI-ZORLANTI BOZUKLUĞU ÇERÇEVESİNDE İNCELENMESİ	Klinik Psikolog, Yasemin DOĞAN

No: 4

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Assistant Professor, Hüseyin YILMAZ	1	KAMU YÖNETİMİNDE HALKLA İLİŞKİLERDEN YÖNETİM İLETİŞİMİNE: DEĞİŞEN VATANDAŞ- KURUM İLİŞKİSİ ÜZERİNE BİR DERLEME	Dr. Sibel ALAK Prof. Dr. Ahmet TUNÇ
		2	KAMU YÖNETİMİNDE STRATEJİK İLETİŞİMİN ROLÜ: KAMU POLİTİKALARININ OLUŞTURULMASI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME	Dr. Sibel ALAK Prof. Dr. Ahmet TUNÇ
		3	THE ASYMMETRIC EFFECTS OF SECTORAL GROWTH ON UNEMPLOYMENT IN TÜRKİYE: AN EXTENDED OKUN'S LAW APPROACH	Assistant Professor, Hüseyin YILMAZ
		4	ŞEFKAT SİSTEMİ ÇÖKERSE	Öğr. Gör. Dr. Eda ÖZTÜRK BELET
		5	İBN TEYMİYYE'NİN TEFSİRÜ ÂYÂTİN ÜŞKİLET ADLI ESERİ BAĞLAMINDA MÜŞKİLÜ'L-KUR'ÂN ANLAYIŞI VE YORUM YÖNTEMİ	Yahya Vefaoğlu
		6	FÜCÜR KAVRAMI ÇERÇEVESİNDE KUR'ÂN'DA İNSAN TASAVVURU VE KUR'ÂNİ SORUMLULUK ANLAYIŞI	Dr. Öğretim Üyesi Esmâ ÇETİN

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Res. Asst. Dr., Abdil ARIK	1	NÖROMUHASEBE, KAYNAK MUHASEBESİ VE YÖNETİM MUHASEBESİ ENTEGRASYONU: STRATEJİK KARAR ALMA SÜREÇLERİ ÜZERİNE SİNERJİK BİR MODEL ÖNERİSİ	Dr. Oğuz KUYUMCU
		2	KAMU SEKTÖRÜNDE KÜLTÜREL MİRAS VARLIKLARININ MALİYET VE YÖNETİM MUHASEBESİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ: RESTORASYON VE KORUMA FAALİYETLERİ ÜZERİNE BİR MODEL ÖNERİSİ	Dr. Oğuz KUYUMCU
		3	AN EVALUATION OF CLOUD KITCHEN SERVICES FROM THE PERSPECTIVE OF THE MARKETING MIX: A STUDY WITHIN THE CONTEXT OF THE 7P MODEL	Res. Asst. Dr., Abdil ARIK
		4	FAST PAYMENT ANOMALIES AND MACROECONOMIC FACTORS: AN ARDL ANALYSIS	Ramazan Ersin Kanar Docent, Kaya Tokmakçioğlu
		5	DİJİTAL ÇAĞIN ETKİSİ İLE DEĞİŞEN REFERANS GRUBU TANIMI: DİJİTAL REFERANS GRUPLARI VE TÜKETİCİ DAVRANIŞLARI	Dr. Esra AKSAY
		6	TEDARİK ZİNCİRİ VE LOJİSTİK FAALİYETLERİNDE BİLİŞİM TEKNOLOJİLERİ KULLANIMININ FAYDA ALGISI	Nuh KÜTÜKÇÜ Doç. Dr. Ahmet ÇETİNDİŞ
		7	HİZMET SEKTÖRÜNDE ÇEVİRİMİÇİ TÜKETİCİ ŞİKAYETLERİNİN NİTEL ANALİZİ: TÜKETİCİ DENEYİMİ BOYUTLARI VE TEKRAR ZİYARET NİYETİ	Doç. Dr. Fatma Gül Bilginer Özsaatçı Merve Burcu Sevinç

No: 2

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Assis.Prof. Dr. Hanaa Abdelaziz,	1	ECONOMIC IMPACT OF TOURISM DEVELOPMENT IN CUBA	Prof. Dr. Maria Fernandez, Dr. Carlos Ruiz, Ana Lopez Jose Martinez,
		2	ANALYSIS OF SOCIAL POLICIES AND ECONOMIC GROWTH IN CUBAN ECONOMY	Assoc. Prof. Dr. Elena Garcia
		3	THE ROLE OF SMALL AND MEDIUM ENTERPRISES IN ALBANIAN ECONOMIC TRANSITION	Dr. Arben Kola, Assis. Prof. Dr. Elira Shehu, Gentian Dervishi
		4	FINANCIAL MARKET DEVELOPMENT AND INVESTMENT STRATEGIES IN ALBANIA	Prof. Dr. Ervin Meta, Dr. Blerina Hoxha
		5	INFLATION DYNAMICS AND MONETARY POLICY EFFECTIVENESS IN IRAN	Dr. Reza Kian, Prof. Dr. Leila Mohammadi
		6	LABOR MARKET CHALLENGES AND UNEMPLOYMENT TRENDS IN IRANIAN ECONOMY	Mohammad Salehi, Assoc. Prof. Dr. Sara Razavi Prof. Dr. Mona Youssef
		7	ANALYSIS OF FISCAL POLICIES AND PUBLIC DEBT MANAGEMENT IN EGYPT	Dr. Ahmed Naguib,
		8	AGRICULTURAL SECTOR'S CONTRIBUTION TO EGYPTIAN ECONOMIC DEVELOPMENT	Assoc. Prof. Dr. Karim Hassan, Mostafa El-Sayed, Sarah Kamal Omar Said
		9	THE IMPACT OF GLOBAL TRADE POLICIES ON EGYPT'S EXPORTS	Assis.Prof. Dr. Hanaa Abdelaziz,

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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. Somchai Phanvilay,	1	THE EVOLUTION OF TRADITIONAL LAO POETRY IN CONTEMPORARY LITERATURE	Assoc. Prof. Dr. Somchai Phanvilay,
		2	CULTURAL IDENTITY AND LANGUAGE PRESERVATION IN LAO FOLKTALES	Assoc. Prof. Dr. Bounmy Keomany, Phouthone Phommasane, Dr. Sombath Vilay Dr. Ketsana Vang
		3	THE INFLUENCE OF ANCIENT EGYPTIAN MYTHOLOGY ON MODERN LITERARY THEMES	Dr. Ahmed El-Sayed, Prof. Dr. Mona Hassan
		4	POSTCOLONIAL NARRATIVES IN EGYPTIAN LITERATURE: A CRITICAL ANALYSIS	Assis. Prof. Dr. Youssef Mohamed, Dina Abdelrahman Prof. Dr. Habibullah Rahimi, Dr
		5	REPRESENTATIONS OF WAR AND PEACE IN AFGHAN LITERATURE	. Fariba Saeedi
		6	THE ROLE OF ORAL TRADITIONS IN AFGHANISTAN'S LITERARY IDENTITY	Nazan Gul, Assoc. Prof. Dr. Ahmad Wali
		7	EXPLORING KYRGYZ EPIC POETRY AND ITS SOCIAL FUNCTIONS	Assoc. Prof. Dr. Bekmamat Umetaliev Dr. Aizada Toktogulova

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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. Elena Smirnova	1	THE EVOLUTION OF INTERNATIONAL HUMAN RIGHTS LAW IN AFRICA	Prof. Dr. Amina Dube, Kwame Nkrumah, Zanele Khumalo
		2	LEGAL FRAMEWORKS FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION IN SUB-SAHARAN AFRICA	Dr. Michael Owusu, Assoc. Prof. Dr. Thandi Mbeki, Samuel Adeyemi
		3	THE ROLE OF SHARIAH LAW IN OMAN'S LEGAL SYSTEM	Fatima Al-Harthy, Dr. Saif Al-Rawahi
		4	ANALYSIS OF COMMERCIAL LAW REFORMS IN OMAN FOR FOREIGN INVESTMENTS	Assoc. Prof. Dr. Khalid Al-Amri, Nawal Said, Faisal Al-Hinai, Dr. Mariam Al-Kindi
		5	CYBERSECURITY LEGISLATION AND DATA PROTECTION IN RUSSIA	Igor Petrov, Dr. Elena Smirnova
		6	CRIMINAL JUSTICE REFORMS AND HUMAN RIGHTS PROTECTION IN RUSSIA	Assoc. Prof. Dr. Alexei Volkov, Dr. Oksana Kuznetsova, Ivan Morozov
		7	CHALLENGES OF ENFORCING INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS IN NIGERIA	Prof. Dr. Chinedu Okeke, Ifeoma Nwosu

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Dr. Fatima Al-Thani,	1	THE socioeconomic IMPACTS OF RURAL-URBAN MIGRATION IN ETHIOPIA	Prof. Dr. Amanuel Tesfaye, Dr. Helen Desta
		2	ANALYSIS OF REFUGEE SETTLEMENT PATTERNS AND INTEGRATION CHALLENGES	Bemnet Worku, Mesfin Abebe, Dr. Fikremariam Tilahun
		3	URBANIZATION AND MIGRANT LABOR MARKETS IN AZERBAIJAN	Assoc. Prof. Dr. Leyla Mammadova, Elvin Hasanov, Farid Guliyev
		4	CULTURAL ADAPTATION STRATEGIES OF INTERNALLY DISPLACED PERSONS	Dr. Kamran Aliyev, Nigar Huseynova
		5	MIGRATION TRENDS AND THEIR EFFECT ON URBAN DEVELOPMENT IN CHILE	Prof. Dr. Maria Fernandez, Carlos Rojas
		6	THE ROLE OF POLICY IN MANAGING INTERNATIONAL MIGRATION FLOWS	Dr. Sofia Ramirez, Assis. Prof. Dr. Juan Torres, Mateo Valenzuela
		7	THE IMPACT OF MIGRATION ON LABOR MARKETS IN QATAR	Dr. Fatima Al-Thani, Prof. Dr. Khalid Al-Mansoori

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 17 Temmuz / July 17, 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	Assoc. Prof. Dr. Alina Bekeotova	1	THE EVOLUTION OF CONTEMPORARY AFRICAN ART AND ITS GLOBAL INFLUENCE	Assis. Prof. Dr. Chinedu Okafor
		2	DIGITAL TECHNOLOGIES AND THEIR IMPACT ON TRADITIONAL NIGERIAN ART FORMS	Dr. Ifeanyi Umeh, Oluchi Nwankwo, Emeka Onwudiwe
		3	EXPLORING THE RESURGENCE OF FOLK ART IN KAZAKHSTAN'S MODERN CULTURE	Assoc. Prof. Dr. Alina Bekeotova
		4	CULTURAL IDENTITY AND VISUAL ARTS IN KAVKAZ REGION	Dr. Timur Kuanyshbek, Assis. Prof. Dr. Zhanara Ismailova
		5	THE INFLUENCE OF SPANISH BAROQUE ART ON MODERN PAINTING TECHNIQUES	Prof. Dr. Marta Garcia, Luis Fernandez, Dr. Javier Ruiz
		6	THE ROLE OF PUBLIC ART IN URBAN SPACES IN SPAIN	Dr. Elena Sanchez, Assoc. Prof. Dr. Carlos Moreno, Ana Lopez, Miguel Ramos
		7	ARTISTIC EXPRESSIONS IN DUBAI: A FUSION OF TRADITION AND MODERNITY	Dr. Fatima Al Mansoori, Assis. Prof. Dr. Saeed Al Falasi

TROIA 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL SCIENCES July 17 – 19, 2026 CANAKKALE Meeting ID: 885 7151 8350 Passcode: 202224 19 Temmuz / July 19, 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	Assoc. Prof. Dr. Süleyman BALCI	1	EXAMINING THE RELATIONSHIP BETWEEN TEACHERS' PERCEPTIONS OF MORAL COMPETENCE AND THEIR LEVELS OF COMPLIANCE WITH PROFESSIONAL ETHICAL PRINCIPLES	Psychological Counselor Berrenur ŞAHİN Assoc. Prof. Dr. Süleyman BALCI
		2	INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE LEVELS OF TRUTHFULNESS AND HONESTY AND SELF-CONTROL SKILLS IN ADOLESCENTS	Kübra EKMEKÇİOĞLU Assoc. Prof. Dr. Süleyman BALCI
		3	AN INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN TEACHERS' PROFESSIONAL ETHICS LEVELS AND THEIR PERCEPTIONS OF ORGANIZATIONAL JUSTICE	Emre TÜZÜNAK Doç. Dr. Süleyman BALCI
		4	EXAMINING THE RELATIONSHIP BETWEEN SCIENTIFIC ETHICAL SENSITIVITY AND HONESTY TENDENCY AMONG STUDENTS OF VOCATIONAL EDUCATION CENTER	Zeynep SAK Assoc. Prof. Dr. Süleyman BALCI
		5	EXAMINATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN UNIVERSITY STUDENTS' ACADEMIC PROCRASTINATION BEHAVIORS AND THEIR ATTITUDES TOWARD PLAGIARISM	Kübra GÜNAY GÜRBÜZ Doç. Dr. Süleyman BALCI
		6	INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN PARENTS' PARENTING ATTITUDES AND THEIR LEVELS OF MORAL MATURITY	Büşra LEVENT Doç. Dr. Süleyman BALCI

Contents

YENİ NESİL SUMP FİLTRESİ TASARIMININ GELİŞTİRİLMESİ VE FARKLI MESH BOYUTLARININ BULAŞIK MAKİNESİ YIKAMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....	1
ATIK CAM TOZU VE CEVİZ KABUĞU TOZU KATKILI GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİPROPİLEN KOMPOZİTLERİN SU ABSORPLAMASININ SERTLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ.....	8
ATIK CAM VE FINDIK KABUĞU DOLGULU VİNİLESTER ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ.....	19
O-RİNG KANALI ÇAPININ O-RİNG ÇAPINA OLAN ORANININ SIZDIRMAZLIK PERFORMANSINA ETKİSİ....	30
NEVŞEHİR POMZA AGREGASI İLE ÜRETİLEN LİFLİ HAFİF HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ	39
POMZA AGREGALI HAFİF HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİNE MİKRONİZE BAZALT VE DERE KUMU DOLGU MALZEMELERİNİN ETKİSİ.....	48
NaOH İLE ALKALİ YIKAMA ÖN MUAMELESİNİN MALKARA VE SİBİRYA KÖMÜRLERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞINA ETKİSİ	57
FORMULATION DEVELOPMENT AND SAFETY CHARACTERIZATION OF A NATURAL BOTANICAL HAIR CARE OIL	72
<i>FUSARIUM GRAMINEARUM</i> 'A KARŞI ÇEŞİTLİ ANTİFUNGALLERİN <i>İN VİTRO</i> ETKİNLİK DEĞERLENDİRMESİ	84
PLEUROTUS A VE PLEUROTUS B MEMBRAN SALDIRI KOMPLEKSİ/PERFORİN-BENZERİ PROTEİNLERİNİN MOLEKÜLER KLONLANMASI.....	85
MAVİ KANTARON'DAN ELDE EDİLEN FRAKSİYONLARIN FİTOKİMYASAL VE SİTOGENETİK ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ.....	86
<i>EQUISETUM ARVENSE</i> BİTKİSİNDE TANIMLANAN MİRNA'LARIN İNSAN GENOMUNDAKİ POTANSİYEL HEDEF GENLERİNİN BİYOBİYOİNFORMATİK ANALİZİ.....	87
GÖLLER YÖRESİNDE TOROS GÖKNARININ (<i>Abies Cilicica</i>) İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ALTINDA GÜNÜMÜZ VE GELECEKTEKİ POTANSİYEL DAĞILIMI	88
ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE MİKROPLASTİKLERİN AKİBETİ VE ÇEVRESEL RİSKLERİ.....	89
YENİ ORTAYA ÇIKAN KİRLETİCİLER OLARAK UYUŞTURUCU MADDELER: ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE AKİBET VE ÇEVRESEL RİSK	98
EXPLAINABLE MACHINE LEARNING FOR CORONARY HEART DISEASE CLASSIFICATION: A NESTED CROSS-VALIDATION STUDY ON THE CLEVELAND DATASET WITH CONSENSUS FEATURE SELECTION AND SHAP INTERPRETATION.....	108
HANDLING CLASS IMBALANCE IN MEDICAL MACHINE LEARNING: A NARRATIVE REVIEW OF RESAMPLING, ALGORITHMIC, AND EVALUATION STRATEGIES	118
COMPARISON OF HOT AND COLD PRESSED BULK MgB ₂ WITH MAGNESIUM STEARATE ADDITION.....	126
STATİK Q AÇISI DİNAMİK İNİŞ MEKANİZMASINI YANSITIYOR MU?	136
A COMPARATIVE EVALUATION OF DEEP LEARNING MODELS FOR SHORT-TERM LOAD FORECASTING IN LOW-VOLTAGE SMART GRIDS.....	138

BİR KİMYASAL TESİSTEKİ KOMPANZASYON VE UPS ÇALIŞMA KOŞULLARININ GÜÇ FAKTÖRÜ VE AKIM HARMONİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	156
MISIR ENDÜSTRİYEL TESİSİNDE PROSES YÜKLERİ VE DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİNİN HARMONİK PERFORMANSININ ANALİZİ	167
RÜZGAR VE GÜNEŞ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ İÇİN İZLEME ARAYÜZÜ TASARIMI	177
SÜPERKAPASİTÖR UYGULAMALARI İÇİN KARBOKSİMETİL SELÜLOZ (CMC) TABANLI ESNEK ELEKTROTLARDA KURUTMA KOŞULLARININ ELEKTROKİMYASAL PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ	193
GLOBAL BURDEN OF INFECTIOUS DISEASES AND HEALTHCARE RESPONSE IN AFRICA	204
NUTRITION AND CHILDHOOD DISEASE PREVENTION IN SUB-SAHARAN AFRICA	205
HEALTHCARE ACCESSIBILITY AND CHALLENGES IN RURAL KYRGYZSTAN.....	206
MENTAL HEALTH SERVICES DEVELOPMENT IN KYRGYZSTAN: A STRATEGIC OVERVIEW	207
EPIDEMIOLOGY OF MALARIA IN YEMEN AND PREVENTIVE MEASURES.....	208
MATERNAL AND CHILD HEALTHCARE CHALLENGES IN CONFLICT-AFFECTED AREAS OF YEMEN	209
EMERGING PATTERNS IN CHRONIC DISEASES AND PUBLIC HEALTH IN ERITREA.....	210
VACCINATION UPTAKE AND PUBLIC HEALTH OUTCOMES IN ERITREA.....	211
STRATEGIES FOR WATER SANITATION TO REDUCE DISEASES IN ERITREAN COMMUNITIES	212
ADVANCES IN BIOACTIVE COMPOUNDS EXTRACTION FROM FUNCTIONAL FOODS	213
APPLICATION OF NANOTECHNOLOGY IN FOOD PRESERVATION AND SAFETY	214
DEVELOPMENT OF NATURAL FOOD ADDITIVES FROM PLANT EXTRACTS	215
EVALUATION OF PROBIOTIC STRAINS FOR DAIRY PRODUCT ENRICHMENT	216
SHELF-LIFE EXTENSION TECHNIQUES FOR PERISHABLE FOOD ITEMS.....	217
OPTIMIZATION OF ENZYMATIC PROCESSING FOR FOOD TEXTURE IMPROVEMENT	218
IMPACT OF FOOD PACKAGING MATERIALS ON QUALITY AND SAFETY	219
ADVANCES IN NANOMATERIALS FOR SUSTAINABLE ENERGY APPLICATIONS	220
OPTIMIZATION OF SMART GRID SYSTEMS USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES	221
DESIGN AND ANALYSIS OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS	222
RECENT DEVELOPMENTS IN RENEWABLE ENERGY HARVESTING METHODS	223
APPLICATION OF IOT IN INDUSTRIAL AUTOMATION AND CONTROL.....	224
DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR DEFECT DETECTION IN MANUFACTURING	225
ADVANCED ROBOTICS FOR PRECISION AGRICULTURE	226
SMART TRANSPORTATION SYSTEMS AND TRAFFIC MANAGEMENT USING AI	227
SUSTAINABLE WATER RESOURCE MANAGEMENT IN AFRICAN URBAN AREAS.....	228
ADVANCES IN WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGIES FOR AFRICAN COMMUNITIES	229
ASSESSING SOIL REMEDIATION TECHNIQUES IN KYRGYZSTAN'S INDUSTRIAL ZONES	230
AIR POLLUTION IMPACTS ON PUBLIC HEALTH IN KYRGYZSTAN URBAN CENTERS	231

EVALUATION OF SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEMS IN YEMEN	232
STRATEGIES FOR MITIGATING WATER POLLUTION IN YEMENI AGRICULTURE	233
MONITORING ENVIRONMENTAL CHANGES USING REMOTE SENSING IN ERITREA.....	234
MATERNAL HEALTHCARE ACCESS AND SOCIOECONOMIC BARRIERS AMONG WOMEN IN RURAL KYRGYZSTAN.....	235
PERCEPTIONS AND PRACTICES OF ANTENATAL NUTRITION AMONG PREGNANT WOMEN IN BISHKEK	236
PSYCHOSOCIAL STRESSORS AND COPING STRATEGIES AMONG PREGNANT WOMEN IN THE WEST BANK	237
BARRIERS TO ADEQUATE PRENATAL CARE IN GAZA: PERSPECTIVES OF WOMEN AND HEALTH PROVIDERS.....	238
IMPACT OF WOMEN'S EDUCATION ON MATERNAL AND INFANT HEALTH OUTCOMES IN SINGAPORE	239
CULTURAL INFLUENCES ON CONTRACEPTIVE USE DECISIONS AMONG SINGAPOREAN WOMEN	240
PREGNANCY-RELATED HEALTH LITERACY AND OUTCOMES IN OMANI WOMEN	241
SOCIAL SUPPORT NETWORKS AND MATERNAL WELL-BEING DURING PREGNANCY IN OMAN.....	242

YENİ NESİL SUMP FİLTRESİ TASARIMININ GELİŞTİRİLMESİ VE FARKLI MESH BOYUTLARININ BULAŞIK MAKİNESİ YIKAMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

E&P Laboratuvarı Test Uzmanı, Onur TURHAN
RENTA ELEKTRİKLİ EV ALETLERİ SAN.VE DIŞ.TİC.LTD.ŞTİ,
onur.turhan@haier-europe.com - 0000-0002-6664-3389

ÖZET

Ev tipi bulaşık makinelerinde su sirkülasyon sistemi, temizlik performansı ve kaynak verimliliğinin belirlenmesinde temel bir rol oynamaktadır. Bu sistem içerisinde sump bölgesi, yıkama suyunun toplanması ve yeniden dağıtılmasından sorumlu ana yapı olup, burada kullanılan filtre tasarımı sistemin hidrodinamik davranışını ve suyun temizlik kalitesini doğrudan etkilemektedir. Filtrasyon verimliliği ile akış direnci arasındaki denge, yıkama performansını belirleyen kritik tasarım parametrelerinden biridir.

Bu çalışmada, geleneksel sump filtre tasarımına alternatif olarak geliştirilmiş yeni nesil bir filtre mimarisi sunulmuş ve farklı gözenek boyutlarına sahip mesh yapılarının sistem performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında 18 µm ve 41 µm gözenek açıklığına sahip filtreler ve geliştirilen filtre tasarımı mevcut sistem ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar, uluslararası **EN 60436** standart test prosedürlerine uygun koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Her bir filtre konfigürasyonu için yıkama performans indeksleri, partikül filtrasyon kapasitesi ve püskürtme sistemi üzerindeki tıkanma eğilimleri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, filtre gözenek boyutunun hem kir tutma davranışı hem de su sirkülasyon karakteristikleri üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın temel hipotezi, daha küçük gözenek yapılarının partikül tutma verimini artırırken hidrolik direnç nedeniyle su dolaşımını sınırlandırabileceği, daha büyük gözeneklerin ise akış avantajı sağlamakla birlikte filtrasyon etkinliğini azaltabileceği yönündedir. Bu nedenle optimum mesh boyutunun, filtrasyon kapasitesi ile akış sürekliliği arasında denge sağlayan bir aralıkta oluşması beklenmektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen yeni sump filtresi tasarımının sistem performansını iyileştirme potansiyeline sahip olduğu ve mesh boyutu seçiminin yıkama verimliliği üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Çalışma, filtre tasarımında gözenek optimizasyonunun önemini ortaya koyarak, gelecekte geliştirilecek yüksek verimli bulaşık makinesi sistemleri için mühendislik temelli bir referans sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bulaşık Makinesi, Sump Filtre, Mesh, EN 60436, Yıkama Performansı

Development of a New Generation Sump Filter Design and Investigation of the Effects of Different Mesh Sizes on Dishwasher Washing Performance

E&P Laboratuvarı Test Uzmanı, Onur TURHAN
RENTA ELEKTRİKLİ EV ALETLERİ SAN.VE DIŞ.TİC.LTD.ŞTİ,
onur.turhan@haier-europe.com - 0000-0002-6664-3389

ABSTRACT

In household dishwashers, the water circulation system plays a key role in determining cleaning performance and resource efficiency. In this system, the sump section acts as the main structure responsible for collecting and redistributing the wash water. The filter design used in this area directly affects the hydrodynamic behavior of the system and the cleanliness of the water. The balance between filtration efficiency and flow resistance is one of the critical design parameters that determine washing performance.

In this study, a new generation filter architecture was developed as an alternative to the conventional sump filter design, and the effects of different mesh sizes on system performance were experimentally investigated. Within the scope of the study, filters with 18 μm and 41 μm pore sizes were used. The developed filter design was evaluated by comparing it with the existing reference system.

Experimental studies were conducted in accordance with the international **EN 60436** standard test procedures. For each filter configuration, washing performance indices, particle filtration capacity, and clogging tendency in the spray system were analyzed. The obtained results show that the mesh size has a significant effect on both dirt retention behavior and water circulation characteristics.

The main hypothesis of this study is that smaller pore structures increase particle retention efficiency but may limit water circulation due to higher hydraulic resistance, while larger pore structures provide better flow conditions but reduce filtration effectiveness. Therefore, the optimum mesh size is expected to be in a range that balances filtration capacity and continuous water flow.

As a result, the developed new sump filter design has the potential to improve system performance, and mesh size selection has a direct impact on washing efficiency. This study highlights the importance of pore size optimization in filter design and provides an engineering-based reference for the development of next-generation high-efficiency dishwasher systems.

Keywords: Dishwasher, Sump Filter, Mesh, EN 60436, Washing Performance

1. Giriş

Ev tipi bulaşık makinelerinde yüksek yıkama performansının sürdürülebilir şekilde sağlanabilmesi, su sirkülasyon sisteminin etkin çalışmasına bağlıdır. Yıkama sırasında oluşan gıda kalıntıları ve ince partiküller, dolaşım suyu ile birlikte sistem içerisinde hareket ederek püskürtme kolları ve hidrolik bileşenler üzerinde birikime neden olabilmektedir. Bu durum, su dağılımının homojenliğini bozmakta, püskürtme performansını olumsuz etkilemekte ve uzun süreli kullanımda yıkama veriminin azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, dolaşım suyunun etkin şekilde filtrelenmesi, bulaşık makinesi performansını doğrudan etkileyen temel tasarım kriterlerinden biri olarak değerlendirilmektedir [2,3].

Son yıllarda enerji ve su tüketiminin azaltılmasına yönelik yürütülen çalışmalar, bulaşık makinelerinde hidrolik sistemlerin ve filtre yapılarının geliştirilmesine yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. Avrupa Birliği Ecodesign ve Energy Labelling düzenlemeleri kapsamında enerji ve su verimliliğinin artırılması üreticiler açısından önemli bir hedef haline gelmiştir [6]. Bulaşık makinelerinin performans değerlendirmeleri ise uluslararası IEC/EN 60436 standardında tanımlanan yöntemler doğrultusunda gerçekleştirilmektedir [1,8,9].

Literatürde bulaşık makinesi performansını etkileyen parametreler arasında su sertliği, deterjan tipi, yıkama programı ve püskürtme sistemi üzerine çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, sump bölgesindeki filtre geometrisinin ve filtre gözenek boyutunun yıkama performansına etkisini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır [2,3]. Mevcut çalışmalar daha çok filtre sistemlerinin geliştirilmesi, partikül yönetimi, filtre tıkanmasının azaltılması ve hidrolik akışın iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır [2,3,4,5].

Filtre tasarımında karşılaşılan temel mühendislik problemi, filtrasyon etkinliği ile hidrolik performans arasında optimum dengenin sağlanmasıdır. Küçük gözenek açıklıkları partikül tutma verimini artırırken, artan akış direnci nedeniyle su debisinin azalmasına neden olabilmektedir. Buna karşılık daha büyük gözenek açıklıkları su dolaşımını kolaylaştırmasına rağmen ince partiküllerin sisteme geri dönmesine izin verebilmektedir. Filtre gözenek yapısı ile akış karakteristiği arasındaki bu ilişki, filtrasyon sistemleri üzerine yapılan birçok çalışmada ayrıntılı olarak incelenmiştir [4,5,7].

Bu çalışma kapsamında, ev tipi bulaşık makineleri için yeni nesil bir sump filtresi geliştirilmiş ve farklı mesh boyutlarının sistem performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Geliştirilen filtre tasarımı, EN 60436 standardına uygun yıkama performansı

testleri ile değerlendirilmiş ve farklı filtre konfigürasyonlarının yıkama performansına etkileri karşılaştırılmıştır [1,8,10]. Çalışmanın, yeni nesil bulaşık makinesi filtre sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlaması ve filtre tasarımında optimum mesh seçimine yönelik mühendislik çalışmalarına referans oluşturması hedeflenmektedir.

Bu çalışma kapsamında, ev tipi bulaşık makineleri için yeni nesil bir sump filtresi geliştirilmiş ve farklı mesh boyutlarının sistem performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Geliştirilen filtre tasarımı, EN 60436 standardına uygun yıkama performansı testleri ile değerlendirilmiş ve farklı filtre konfigürasyonlarının yıkama performansına etkileri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın, yeni nesil bulaşık makinesi filtre sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlaması ve filtre tasarımında optimum mesh seçimine yönelik mühendislik çalışmalarına referans oluşturması hedeflenmektedir.

2. Yöntem

Bu çalışma kapsamında, ev tipi bulaşık makinelerinde kullanılan sump filtresi yeniden tasarlanmış ve filtrasyon performansını artırmaya yönelik yeni bir mesh mimarisi geliştirilmiştir. Mevcut sistemde kullanılan referans filtre ile geliştirilen yeni filtre tasarımı aynı çalışma koşullarında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Yeni filtre tasarımında farklı gözenek açıklıklarına sahip mesh yapılarının sistem performansı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla 18 µm ve 41 µm gözenek açıklığına sahip filtreler kullanılmıştır. Bu mesh filtreler, mevcut sistemde kullanılan referans filtre ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar, uluslararası EN 60436 standardında tanımlanan test prosedürlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde aynı bulaşık makinesi platformu, aynı yıkama programı, aynı deterjan ve aynı çevresel koşullar kullanılarak test tekrarları gerçekleştirilmiştir. Böylece yalnızca filtre yapısındaki değişimin yıkama performansına etkisi değerlendirilmiştir.

Performans değerlendirmelerinde EN 60436 standardında tanımlanan porselen, cam ve çatal-kaşık yük kombinasyonları kullanılmıştır. Testler sonunda her filtre konfigürasyonu için yıkama performansı indeksleri belirlenmiş, ayrıca filtrelerin partikül tutma davranışı ve püskürtme sisteminin çalışma karakteristikleri gözlemsel olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen deneysel veriler karşılaştırılarak mesh boyutunun filtrasyon verimliliği ile hidrolik performans üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve yeni geliştirilen filtre tasarımı için optimum gözenek yapısının belirlenmesi amaçlanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Yıkama Performansı					
Porselen	Bardak	Çatal-Bıçak Takımı	Temizlik Puanı	Temizlik Performansı	Durum
3.96	3.2	4.76	4.08	1.139	Mevcut Filtre
3.84	3.46	4.81	4.07	1.115	Mevcut Filtre
4.11	3.66	4.91	4.25	1.197	Prototip Filtre (18 µm)
3.68	3.41	4.89	4.17	1.182	Prototip Filtre (18 µm)
4.01	3.6	4.85	4.11	1.156	Prototip Filtre (41 µm)
3.99	3.5	4.87	4.09	1.147	Prototip Filtre (41 µm)

Tablo 1: Yıkama Performans Tablosu

Test sonuçları (Tablo 1) incelendiğinde, geliştirilen prototip filtrelerin mevcut standart filtreye kıyasla tüm kir gruplarında ve genel performans indekslerinde belirgin bir iyileşme sağladığı görülmektedir.

Mevcut filtre ile gerçekleştirilen testlerde ortalama temizlik puanı 4.07 - 4.08 ve temizlik performansı 1.127 - 1.139 aralığında seyrederken; 18 µm gözenek boyutuna sahip Prototip Filtre ile yapılan testlerde temizlik puanı 4.25'e, temizlik performansı ise 1.197 değerine ulaşmıştır. Bu durum, 18 µm gözenek yapısının yıkama performansında %5'e varan bir artış sağladığını ve test edilen varyasyonlar arasında en yüksek temizlik etkinliğini sunduğunu göstermektedir.

41 µm gözenek boyutuna sahip Prototip Filtre ise ortalama 4.09 - 4.11 temizlik puanı ve 1.147 - 1.156 temizlik performansı ile mevcut filtreye kıyasla daha sınırlı ama pozitif bir iyileşme sergilemiştir. Mikron boyutu küçüldükçe (41 µm'den 18 µm'ye düştükçe) su içerisindeki ince partikül tutma kapasitesinin arttığı, bunun da özellikle bardak ve porselen yüzeylerdeki kalıntı miktarını azaltarak temizlik puanlarını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Filtreli yapının sağladığı bir diğer önemli avantaj ise, püskürtücü kollara ulaşan suyun partiküllerden daha efektif şekilde arındırılmasıdır. Bu sayede nozul tıkanma frekansında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Test sürecinde yapılan basınç ölçümleri, püskürtme kollarına ulaşan suyun akış kararlılığının arttığını ve sistemin uzun süreli yıkama döngülerinde

dahi basınç kaybı yaşamadığını göstermiştir. Bu durum, yıkama döngüsü boyunca suyun mekanik etkisini korumasını sağlayarak temizlik performansındaki artışı desteklemiştir.

4. Sonuç

Bu çalışma genel olarak değerlendirildiğinde, farklı mesh boyutlarında yapılan testlerin belirlenmesinde:

- 18 µm gözenek yapısı ile maksimum yıkama performansı ve yüksek temizlik indeksi sağladığı,
- Püskürtme nozullarındaki tıkanmaları önleyerek uzun vadeli hidrolik ve mekanik performans kararlılığı getirdiği,
- Yıkama etkinliğini artırarak suyun ve mekanik enerjinin daha verimli kullanılmasına katkı sunduğu,
- Suyun sistem içerisinde daha temiz biçimde dolaşımını sağlayarak genel hijyen ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklediği belirlenmiştir.

Bu kapsamda, elde edilen bulgular çalışmanın hem akademik hem de endüstriyel ve ev tipi bulaşık makinesi uygulamaları açısından yenilikçi ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, farklı mikron mesh kombinasyonları üzerinde durularak, hidrolik direnç ile filtrasyon verimliliği arasındaki bağlantı optimize edilmesi planlanmaktadır.

İlgili tasarım için Temmuz 2025 tarihinde patent başvurusu yapılmış olup, çözümün fikri mülkiyet koruması altına alınması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Ennen, G., Brænder, P., Terpstra, P. M. J., Rosén, G., Helstad, S., & Vilöhr, W. (1995). Electric dishwashers for household use, methods for measuring the performance.
- [2] Tang, J. S. (2016). Fine filter cleaner improves function. *Filtration+ Separation*, 53(5), 42-44.
- [3] Tang, J. S. (2017). Dishwasher particle handling optimization. *Filtration+ Separation*, 54(1), 34-37.

- [4] Datta, S., & Redner, S. (1998). **Gradient clogging in depth filtration. Physical Review E, 58(2), R1203.**
- [5] Datta, S., & Redner, S. (2000). **Clogging Time of a Filter. arXiv preprint cond-mat/0001343.**
- [6] European Commission. (2020). **Ecodesign and Energy Labelling: Case study on dishwashers. Brussels: Publications Office of the European Union**
- [7] Gutiérrez, E., Barreto, J. D. J., Garcia-Hernandez, S., Morales, R., & González-Solorzano, M. G. (2020). Decrease of nozzle clogging through fluid flow control. *Metals*, 10(11), 1420.
- [8] Tewes, T. J., Harcq, L., & Bockmühl, D. P. (2023). Use of automatic dishwashers and their programs in Europe with a special focus on energy consumption. *Clean Technologies*, 5(3), 1067-1079.
- [9] Brückner, A., & Stamminger, R. (2015). **Consumer-relevant assessment of automatic dishwashing machines by a new testing procedure for ‘automatic’ programmes. Energy Efficiency, 8(1), 171-182.**
- [10] U.S. Department of Energy. (2023, January 18). Energy conservation program: Test procedure for dishwashers. *Federal Register*, 88(11), 2843–2862.

ATIK CAM TOZU VE CEVİZ KABUĞU TOZU KATKILI GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİPROPİLEN KOMPOZİTLERİN SU ABSORPLAMASININ SERTLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Doç. Dr. İlyas Kartal

Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 34722, İstanbul-TÜRKİYE, ilyaskartal@marmara.edu.tr - ORCID: 0000-0001-9677-477X

Aslıhan Avşar

Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 34722, İstanbul-TÜRKİYE, aslihanavsar96@gmail.com - ORCID:0009-0008-1601-4593

ÖZET

Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş polipropilen matrisli kompozitlerin su absorplama davranışları ve bu sürecin Shore D sertlik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kompozit sistemlerde takviye elemanı olarak atık cam tozu ve ceviz kabuğu tozu tekil ve hibrit formlarda farklı oranlarda kullanılmıştır. Dolgu ile matris arasındaki ara yüzey bağını ve kimyasal etkileşimi güçlendirmek amacıyla formülasyonlara ağırlıkça %5 oranında maleik anhidrit aşılı polipropilen ilave edilmiştir. Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen standart numuneler, 120 gün boyunca oda sıcaklığında suda bekletilerek su absorplama testine tabi tutulmuş; süreç boyunca ağırlık değişimleri ve Shore D sertlik değerleri periyodik olarak kaydedilmiştir.

Elde edilen bulgular, matrise ceviz kabuğu tozu ilavesinin hidrofilik karakterden dolayı su absorplama oranını belirgin şekilde artırdığını, cam tozu katkısının ise bu artışı sınırladığını göstermektedir. En yüksek su emme değeri %30 ceviz kabuğu tozu içeren numunede (%0,817) ölçülmüştür. Kuru durumdaki en yüksek sertlik değeri 62 Shore D ile %30 cam tozu içeren numunede elde edilirken, su absorplama sonrasında tüm numune gruplarında yaklaşık 2 Shore D seviyesinde kararlı bir sertlik artışı gözlenmiştir. Sonuçlar, su nüfuziyetinin kompozit yapıda sertlik kaybına yol açacak düzeyde bir bozunma yaratmadığını ve mekanik performans üzerinde esas belirleyici faktörün dolgu tipi ile dolgu oranı olduğunu ortaya koymuştur. Polimer kompozitlerde su absorpsiyonunun genellikle plastikleşme etkisi nedeniyle sertliği azaltması beklenmekle birlikte, bu çalışmada elde edilen sonuçların; geri dönüştürülmüş polipropilen matrisinde meydana gelen mikroyapısal yeniden düzenlenme ve dolgu-matris ara yüzeyindeki değişimlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra Shore D testinin yüzey direncine duyarlı olması nedeniyle, dolgu partiküllerinin oluşturduğu yüzey sertleşmesi de ölçülen sertlik değerlerinin artmasına katkıda bulunmuş olabilir.

Anahtar Kelimeler: Geri dönüştürülmüş polipropilen, atık cam tozu, ceviz kabuğu tozu, mekanik özellikler

1.GİRİŞ

Son yıllarda, hem plastik üretiminde hem de kullanımında küresel ölçekte önemli bir artış yaşanmıştır. Plastiklere olan ilgi, hafif, su geçirmez, esnek, dayanıklı ve uygun maliyetli olması gibi çok sayıda avantajından kaynaklanmaktadır. Ancak, bu faydaların yanı sıra, zayıf mekanik özellikler, biyolojik olarak parçalanamama ve sıcaklık değişimlerine duyarlılık gibi önemli dezavantajlar da vardır. Plastik kullanımına ilişkin en önemli sorunlardan biri, doğal bozunma süreçlerine karşı direnci nedeniyle ciddi bir çevresel yük oluşturan plastik atıkların dünya çapında birikmesidir. Bu atıklar toprağı ve suyu kirletir, yağmur suyu tahliye kanallarını ve şehir drenaj sistemlerini tıkar, sellere, mal hasarına ve bazen ölümlere yol açar. Sonuç olarak, bilim insanları yıllardır plastik atık sorununa çözümler bulmaya daha fazla odaklanmaktadır. Plastik atık üzerine yapılan araştırmalar, bertarafı için çok çeşitli alternatifleri kapsamlı bir şekilde incelemiştir. En yaygın kullanılan yöntemler arasında mekanik geri dönüşüm, yakma ve depolama yer almaktadır. Ancak, geleneksel depolama ve yakmanın olumsuz çevresel etkileri olabileceğı yaygın olarak kabul edilmektedir. Örneğin, depolama, toprağın, yeraltı suyunun ve yakındaki yüzey sularının uzun vadeli kirlenmesine yol açabilir. Öte yandan, yakma, zehirli gazlar (örneğin, karbon monoksit, furanlar ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar) gibi zararlı yan ürünler üretebilir ve insanlar ve çevredeki ortam için yerel toksisite riskleri oluşturabilir ve yakındaki hayvan türlerinin yaşam alanlarını potansiyel olarak bozabilir. Buna karşılık, plastik atıkların mekanik geri dönüşümü, çevre dostu bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, plastik atık geri kazanım oranı, büyük ölçüde geri dönüştürülmüş plastiklerin düşük ekonomik değeri ve teknik destek eksikliği nedeniyle nispeten düşük kalmaktadır. Küresel olarak, şu anda plastik atıkların yalnızca yaklaşık %20'si geri dönüştürülmektedir. Şu anda polipropilen (PP), en yaygın kullanılan plastik türlerinden biridir ve genellikle daha sert ve dayanıklıdır. Ek olarak, PP'nin normal sıcaklıkta bazı diğer termoplastiklere göre daha fazla termal dayanım, daha iyi elastikiyet ve tokluğa sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, büyük miktarda atık PP geri dönüştürülebilir ve çeşitli mühendislik uygulamalarında bakir plastiklerin yerine kullanılabilir [1-3].

Kompozit malzemelere olan talebin hızla artması, bu malzemelerin yapısı, özellikleri ve performansının gelişimini hızlandırmıştır. İnsan ihtiyaçları değıştikçe ve teknoloji mevcut seviyeye ulaştıkça, farklı özelliklere sahip daha fonksiyonel malzemelere olan ihtiyaç artmıştır. Kompozit üretiminde kullanılan çeşitli takviye kaynakları arasında, çevre dostu, sürdürülebilir ve doğal olanlar, geleneksel takviyelere önemli bir alternatif haline gelmiştir [4]. Geleneksel malzemelerin çevresel etkileri ve sınırlı kaynaklardan elde edilebilmeleri, doğal dolgulu polimer bazlı kompozitlerin önemini artırmıştır. Bu malzemeler, doğal dolgu maddelerinin termoset/termoplastik reçinelerle uyumlu bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilir ve sürdürülebilir bir alternatif sunar. Ağaç talaşı ve lifi, bambu talaşı ve lifi, fındık kabuğı, buğday sapı, ceviz kabuğı, kenevir, keten, jüt, pirinç kabuğı, palmye çekirdeğı ve pamuk gibi doğal kaynaklardan elde edilen lifler ve dolgu maddeleri, kompozitlerde yaygın olarak kullanılan doğal dolgu maddeleridir. Doğal dolgu maddesiyle doldurulmuş polimerik kompozitler, çeşitli endüstriyel alanlarda uygulanabilir ve çeşitli avantajlar sunar. Özellikle, bu malzemelerin çevre üzerindeki olumlu etkisi ve düşük maliyetli üretim süreçleri, onları sürdürülebilir bir gelecek için cazip bir seçenek haline getirmiştir [5]. Bu çalışmada, kompozit için doğal dolgu maddesi

olarak ceviz kabuğu tozu kullanılmıştır. Ceviz kabuğu, yüksek boyutsal stabilite gerektiren dış mekan uygulamalarında, örneğin güverte veya dış cephe kaplamasında, polimer kompozitler için önemli rekabet avantajlarına sahiptir. Bu avantajlardan, ceviz kabuğunda odunla karşılaştırıldığında daha düşük miktarda higroskopik malzeme (selüloz ve hemiselüloz) ve daha yüksek miktarda hidrofobik malzeme (lignin ve ekstraktifler) bulunması sayılabilir [6]. Dünya çapında ceviz üretimi, 2025 yılında yaklaşık 2,7 milyon tondur [7]. Ceviz kabuğu meyvenin toplam ağırlığının %67'sini oluşturduğundan, her yıl yaklaşık 1,5 milyon ton ceviz kabuğu geride kalmaktadır [6].

Bu araştırma çalışmasında inorganik dolgu maddesi olarak atık cam tozu kullanılmıştır. Atık cam, biyolojik olarak parçalanamayan bir malzeme olduğundan, geri dönüştürülemeyen atık camın ayrışması uzun zaman alır ve değerli depolama alanlarını işgal eder. Depolama alanına olan artan talep ve inşaat sektörünün karbon ayak izini azaltmaya verdiği artan önem nedeniyle, atık camın bertarafı önemli bir çevre sorunu haline gelmiştir. Yaygın kullanımı göz önüne alındığında, yıllık küresel üretimi 130 milyon tonu aşan atık camın etkin yönetimi zorunlu hale gelmiştir. Atık cam tozu, yüksek sertlik, düşük yoğunluk, iyi termal kararlılık ve düşük nem emme gibi dolgu maddesi olarak çeşitli avantajlara sahiptir [8].

Deng vd. [9] cam elyaf takviyeli PP ve doğal elyaf takviyeli PP'nin, su emilimi ve bunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi açısından analizini yapmışlardır. Su girişinin tüm PP ve kompozit laminatlarda çekme dayanımı ve Young modülünde ihmal edilebilir bir kayba neden olduğu gözlemlenmiştir.

Lubis vd. [10] yaptıkları çalışmada doğal mısır sapı tozu ile polimerler arasındaki etkileşimi iyileştirerek polipropilenin mukavemetini ve su direncini artırmayı amaçlamışlardır.

Oladele vd. [11] sığır kemiği/kalsiyum karbonat takviyeli polipropilen kompozitlerin geliştirilmesi için, farklı takviye içeriğinin ve parçacık boyutlarının hibrit kompozitlerin termal ve su emme kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmıştır.

Ray vd. [12] cam/jüt/sisal lifi takviyeli polipropilen hibrit kompozitler hazırlamış ve farklı lif yüklemelerinin mekanik ve su emme davranışları üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Su emme yüzdesinin, farklı bileşimlere sahip farklı liflerin eklenmesiyle kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Bujjibab vd. [13] muz lifi/hindistan cevizi lifi takviyeli polipropilen hibrit kompozit numunelerin, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri, lif yüklemesine göre optimize etmiştir. Hibrit malzemelerin nem emme özellikleri değerlendirilmiştir.

Mulana vd. [14] organik bir malzeme olan hindistan cevizi lifini, inorganik bir malzeme olan uçucu kül ile birleştirmiştir. Bu araştırmanın özü, silan bağlayıcı maddenin eklenmesinin çeşitli parametreler üzerindeki etkisini test etmektir; bunlar fiziksel özellikler, mekanik özellikler ve termal özelliklerdir. Silan bağlayıcı malzemenin eklenmesi, kompozitin fiziksel özelliklerini etkileyerek su emiliminde %33 ve kalınlık şişmesinde %0,3 oranında azalmaya neden olmuştur.

Ahmetli vd. [4] kiraz çekirdeği kabuğu ve yumurta kabuğu doğal atıklarının ilk kez yeni bir hibrit dolgu karışımı olarak kullanılmasının fizibilitesini değerlendiren araştırma sonuçlarını

sunmaktadır. Kiraz çekirdeği kabuğunun alkali modifikasyonu, hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinde artışa neden olmuştur. Hibrit dolgudaki yumurta kabuğu miktarının artırılması, yaşlanma sırasında kompozitin su emilimini ve ağırlık artışını azaltmıştır.

Cavdar vd. [15] yaptıkları çalışmada hibrit kompozit numuneleri, PP matris, lignin ve zeolit kullanarak ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama işlemleriyle üretmiştir. Hem zeolit hem de lignin ilavesiyle eğilme dayanımı ve elastik modül önemli ölçüde iyileşmiştir. 28 gün boyunca yapılan su emme testleri, zeolitin kompozitlerin su emme oranını azalttığını göstermiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada geri dönüştürülmüş dolgulu polipropilen, atık cam tozu, ceviz kabuğu tozu ve maleik anhidrit aşılı PP (MAPP) kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş polipropilen içerisinde yanmaz katkı ve kalsit olduğu bilinmektedir. Firma gizliliği nedeniyle katkı oranları makale içerisinde belirtilmemiştir. Atık cam tozunun boyutları 1-50 µm arasındadır, ceviz kabuğu tozu 10 µm boyutundadır. Kompozit formülasyonlara eklenen MAPP, dolgu-matris ara yüzey bağlanmasını iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır. MAPP'ın özellikle polar karakterli cam tozu ve lignoselülozik yapıya sahip ceviz kabuğu tozu ile geri dönüştürülmüş PP matrisi arasında kimyasal ve fiziksel etkileşimleri artırarak daha homojen bir ara yüzey oluşumuna katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

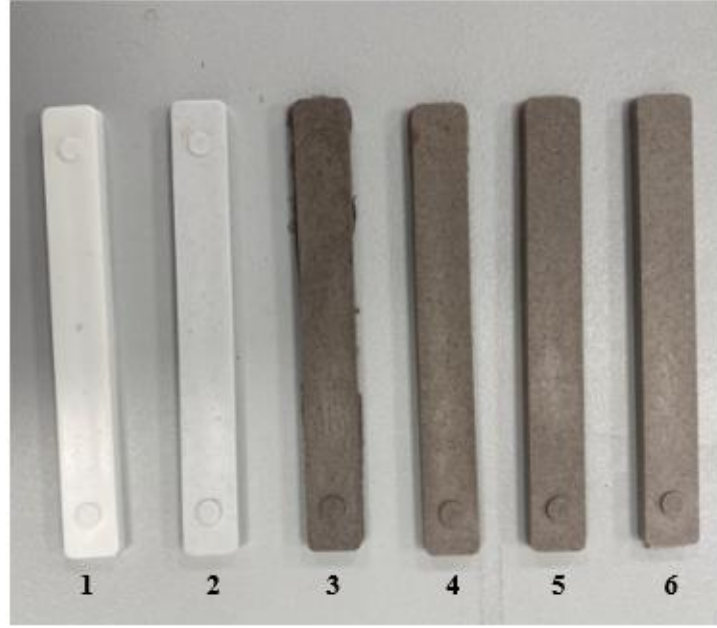
2.2. Numunelerin Hazırlanması

Çizelge 1'de belirtildiği gibi geri dönüştürülmüş PP içerisine belli oranlarda ceviz kabuğu tozu, cam tozu ve MAPP eklenmiştir. Bu numuneler numaralarla gösterilmiş ve içerikleri tabloda belirtilmiştir. Çalışmada cam tozu CT, ceviz kabuğu tozu CKT, geri dönüştürülmüş PP rPP şeklinde belirtilmiştir.

Çizelge 1. Dolguların geri dönüştürülmüş polipropilen içerisindeki ağırlıkça oranları

Numune No	Numune	Cam Tozu (% ağırlıkça)	Ceviz Kabuğu Tozu (% ağırlıkça)	Maleik Anhidrit Aşılı PP(% ağırlıkça)
1	100rPP	0	0	0
2	65rPP30CT5MAPP	30	0	5
3	65rPP30CKT5MAPP	0	30	5
4	65rPP15CT15CKT5MAPP	15	15	5
5	65rPP10CT20CKT5MAPP	10	20	5
6	65rPP20CT10CKT5MAPP	20	10	5

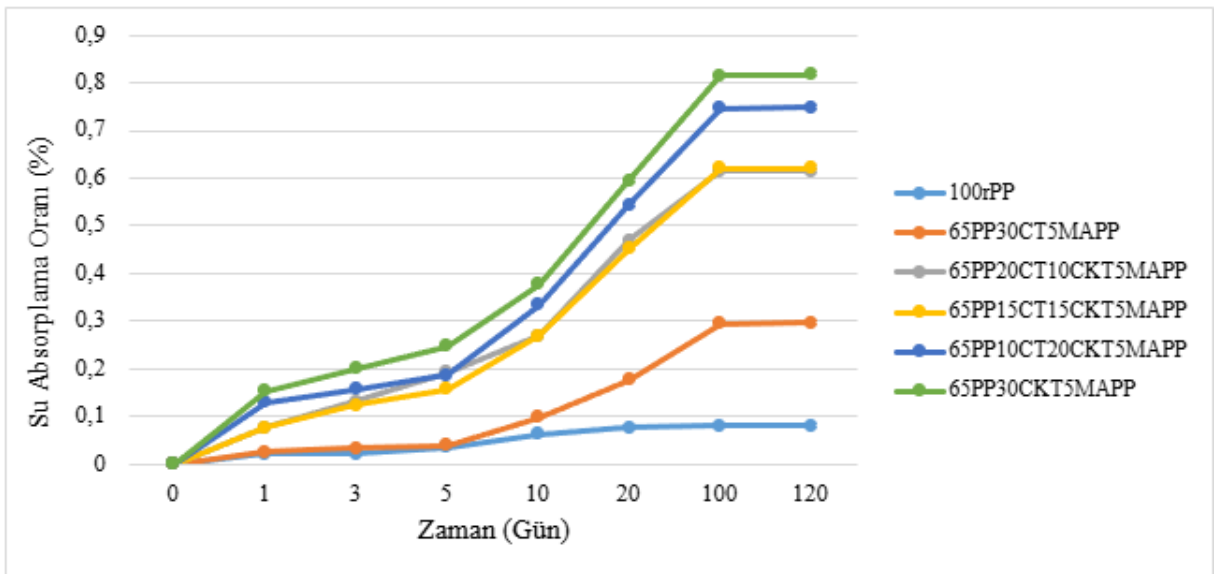
Şekil 1'deki numuneler darbe testi için enjeksiyon cihazında üretilmiştir. Bu numuneler aynı zamanda su absorplama testi için kullanılmıştır. Boyutları 80x10x4 mm'dir.



Şekil 1. Kompozit numunelerin fiziki görüntüleri

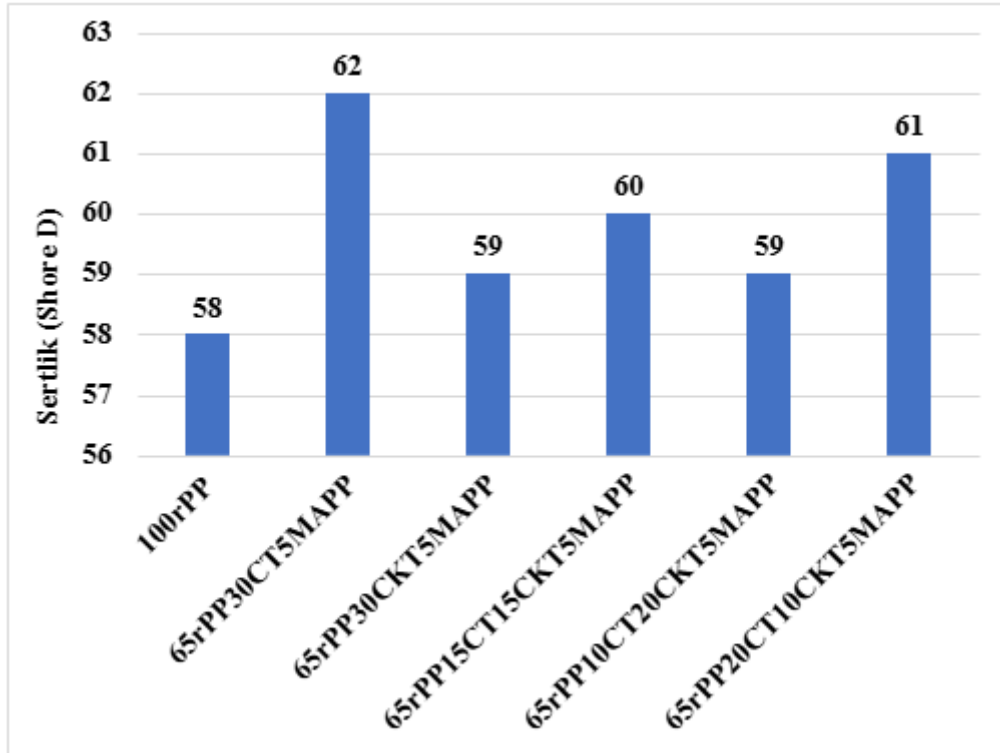
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu araştırma çalışmasında inorganik dolgu maddesi olarak atık cam tozu, organik dolgu olarak atık fındık kabuğu tozu kullanılarak yeşil kompozit malzeme elde edilmiştir. Bununla beraber geri dönüştürülmüş polipropilen matris malzemesi olarak tercih edilmiştir. Şekil 2'de kompozit numunelerin zamana bağlı su absorplama grafiği verilmiştir.



Şekil 2. Kompozit numunelerin zamana bağlı su absorplama grafiği

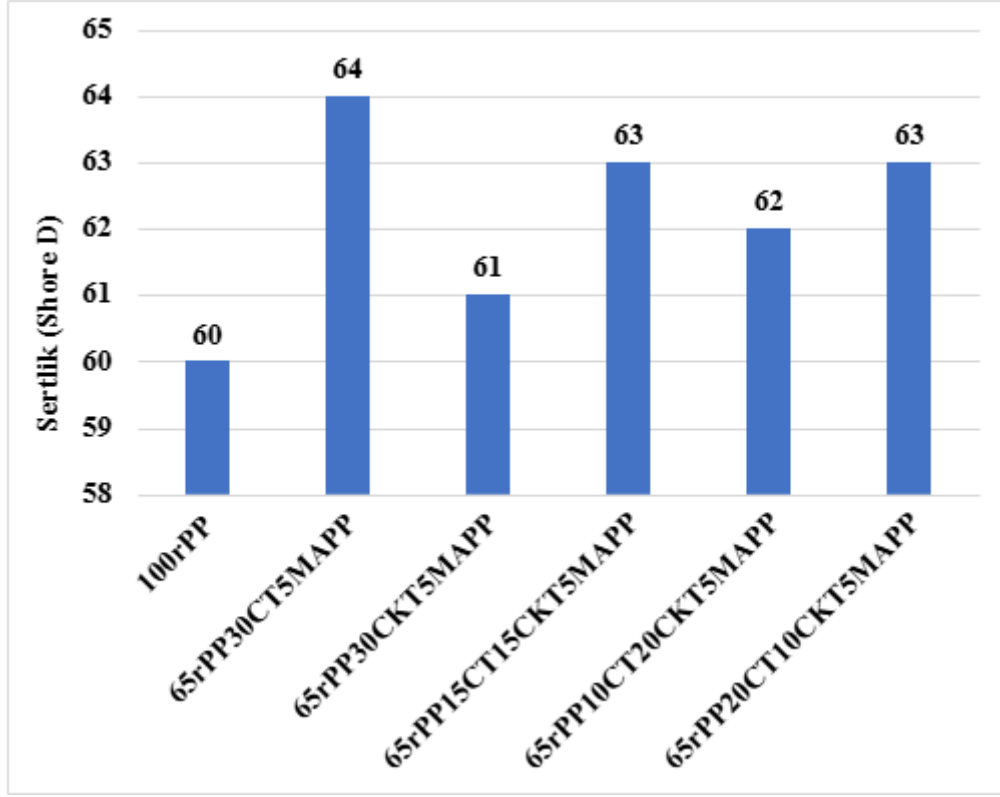
Şekil 2’de kompozit numunelerde su absorplama oranının zamanla arttığı ve 100. gün sonrasında denge seviyesine yaklaştığı belirlenmiştir. rPP numunesi hidrofobik yapısı nedeniyle en düşük su absorplama değerini göstermiştir. Ceviz kabuğu tozu ilavesiyle su absorplama oranları önemli ölçüde artarken, cam tozu katkısının bu artışı kısmen sınırlandırdığı görülmüştür. En yüksek su absorplama değeri %30 ceviz kabuğu tozu içeren kompozitte (%0,817) elde edilmiştir. Sonuçlar, lignoselülozik yapıya sahip ceviz kabuğu tozunun hidrofilik karakterinden dolayı su absorplamayı artırdığını, cam tozunun ise daha düşük su tutma eğilimi sayesinde bu etkiyi azaltabildiğini göstermektedir. Ayrıca 100. ve 120. gün değerlerinin birbirine oldukça yakın olması numunelerin su absorplama bakımından denge noktasına ulaştığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Kompozit numunelerin kuru halde Shore D sertlik değerleri

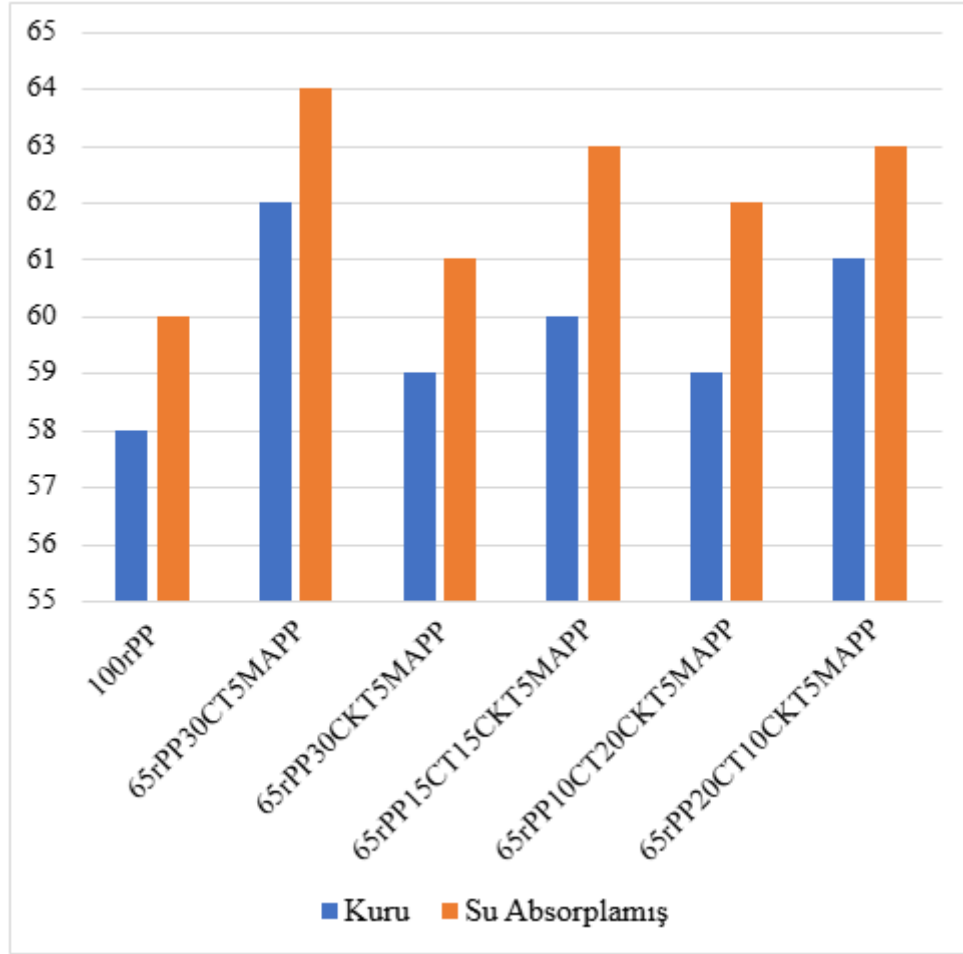
Şekil 3'te kompozit numunelerin kuru halde ölçülen Shore D sertlik değerleri verilmiştir. Geri dönüştürülmüş polipropilen (100rPP) numunesinin sertlik değeri 58 Shore D olarak belirlenmiştir. Takviye malzemesi ilavesiyle birlikte tüm kompozit numunelerde sertlik değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, dolgu malzemelerinin polimer matrisin deformasyonunu sınırlandırması ve malzemenin yüzey direncini artırması ile açıklanabilir. En yüksek sertlik değeri, %30 cam tozu içeren 65rPP/30CT/5MAPP numunesinde 62 Shore D olarak elde edilmiştir. Cam tozu partiküllerinin matris içerisinde daha rijit bir yapı oluşturması, yük altında plastik deformasyonu sınırlandırarak sertlik artışına katkı sağlamıştır. %30 ceviz kabuğu tozu içeren 65rPP/30CKT/5MAPP numunesinde ise sertlik değeri 59 Shore D olarak ölçülmüştür. Bu değer rPP'ye göre artış göstermesine rağmen cam tozu katkılı kompozite göre daha düşük kalmıştır. %15 cam tozu ve %15 ceviz kabuğu tozu içeren numunede sertlik 60 Shore D, %20 cam tozu ve %10 ceviz kabuğu tozu içeren numunede ise 61 Shore D olarak belirlenmiştir. Buna karşılık cam tozu oranının %10'a, ceviz kabuğu tozu

oranının %20'ye çıkarıldığı numunede sertlik değeri 59 Shore D seviyesinde kalmıştır. Bu sonuçlar, hibrit kompozitlerde sertlik üzerinde belirleyici etkinin büyük ölçüde cam tozu miktarından kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 4. Kompozit numunelerin su absorplama sonrası Shore D sertlik değerleri

Şekil 4'te kompozit numunelerin su absorplama testi sonrasında ölçülen Shore D sertlik değerleri gösterilmektedir. Su absorplama sonrasında geri dönüştürülmüş polipropilen (100rPP) numunesinin sertliği 60 Shore D olarak belirlenirken, takviye malzemesi içeren tüm kompozitlerde daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Genel olarak tüm kompozit numuneler, su absorplama sonrasında da kuru halde gözlenen sertlik sıralamasını büyük ölçüde korumuştur. En yüksek sertlik değeri 64 Shore D ile %30 cam tozu içeren 65rPP/30CT/5MAPP numunesinde elde edilmiştir. Cam tozunun yüksek rijitliği ve deformasyona karşı gösterdiği direnç, su absorplama sonrasında da kompozitin yüzey sertliğini korumasını sağlamıştır. Buna karşılık, %30 ceviz kabuğu tozu içeren 65rPP/30CKT/5MAPP numunesinde sertlik 61 Shore D olarak ölçülmüş olup, bu değer cam tozu katkılı kompozitten daha düşük kalmıştır. Ceviz kabuğu tozunun lignoselülozik yapısı ve mekanik özelliklerinin cam tozuna kıyasla daha düşük olması, sertlik üzerindeki katkısının sınırlı kalmasına neden olmuştur. Hibrit kompozitlerde de cam tozu oranının artmasıyla sertlik değerlerinde artış eğilimi gözlenmiştir. %15 cam tozu ve %15 ceviz kabuğu tozu içeren numunede sertlik 63 Shore D, %20 cam tozu ve %10 ceviz kabuğu tozu içeren numunede yine 63 Shore D olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, cam tozu oranının %10'a, ceviz kabuğu tozu oranının ise %20'ye çıkarıldığı numunede sertlik 62 Shore D olarak ölçülmüştür.



Şekil 5. Kompozit numunelerin kuru halde ve su absorplamış haldeki Shore D sertlik değerleri

Şekil 5'te kompozit numunelerin kuru ve su absorplama testi sonrasındaki Shore D sertlik değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, tüm numunelerde su absorplama sonrasında sertlik değerlerinin kuru durumdaki değerlere göre artış gösterdiği görülmektedir. Geri dönüştürülmüş polipropilen numunesinde sertlik değeri 58 Shore D'den 60 Shore D'ye yükselirken, cam tozu, ceviz kabuğu tozu ve hibrit dolgu içeren kompozitlerde de benzer şekilde yaklaşık 2 Shore D'lik artışlar elde edilmiştir. Kuru ve su absorplamış numuneler birlikte değerlendirildiğinde, sertlik bakımından numunelerin sıralamasında önemli bir değişiklik meydana gelmediği görülmektedir. Her iki durumda da en yüksek sertlik değeri %30 cam tozu içeren 65rPP/30CT/5MAPP numunesinde elde edilmiştir. Buna karşılık, %30 ceviz kabuğu tozu içeren kompozit daha düşük sertlik göstermiştir. Hibrit kompozitlerde ise cam tozu oranının artmasına bağlı olarak sertlik değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Bu durum, cam tozunun yüksek rijitliğe sahip yapısından dolayı polimer matrisin deformasyonunu daha etkin şekilde sınırlandırmasıyla ilişkilendirilebilir. Su absorplama sonrasında gözlenen sertlik artışına rağmen kompozitlerin birbirlerine göre sergilediği performansın korunmuş olması, suyun malzemelerin sertlik davranışını önemli ölçüde değiştirmediğini, esas belirleyici faktörün dolgu tipi ve dolgu oranı olduğunu göstermektedir. Özellikle cam tozu içeriğinin artması hem kuru hem de su absorplamış numunelerde daha yüksek Shore D sertliği elde edilmesini sağlamıştır. Bu sonuçlar, cam tozunun kompozitlerin yüzey sertliğini artırmada ceviz kabuğu tozuna kıyasla daha etkili bir takviye malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu araştırma kapsamında, atık cam tozu ve ceviz kabuğu tozu katkılı geri dönüştürülmüş polipropilen hibrit kompozitlerin su absorplama özellikleri ve Shore D sertlik davranışları incelenmiş ve elde edilen temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Kompozit numunelerin su absorplama oranları zamana bağlı olarak artış göstermiş ve 100. günden itibaren doygunluğa ulaşarak denge seviyesine yaklaşmıştır. Hidrofobik karakteri sayesinde en düşük su absorplama eğilimi matris malzemesi rPP'de görülmüştür.
- Lignoselülozik ve hidrofilik yapıya sahip ceviz kabuğu tozunun sisteme dahil edilmesi su absorplama oranını önemli ölçüde yükseltirken, düşük nem tutma eğilimindeki inorganik cam tozu bu artışı kararlı bir şekilde dizginlemiştir. Maksimum su absorplama oranı %30 ceviz kabuğu tozu içeren formülasyonda %0,817 olarak kaydedilmiştir.
- Geri dönüştürülmüş polipropilen numunesinin kuru haldeki sertliği 58 Shore D olarak ölçülmüş, matrise sert ve rijit dolgu partiküllerinin eklenmesiyle plastik deformasyon sınırlandırılmış ve tüm kompozitlerin yüzey sertliği artmıştır. Kuru haldeki en yüksek sertlik, yüksek rijitliği sayesinde deformasyon direncini artıran %30 cam tozu içerikli kompozitte (62 Shore D) elde edilmiştir.
- Hibrit dolgulu kompozit sistemlerde, karışım içerisindeki cam tozu oranının artırılması sertlik değerlerinde yukarı yönlü bir trend oluşturmuştur. Buna karşın, ceviz kabuğu tozu içeriğinin artması malzemenin elastik modülünün cam tozuna kıyasla düşük olması nedeniyle sertlik artışını daha sınırlı düzeyde tutmuştur.
- Su absorplama testi sonrasında sertlik kaybı yaşanmamış; aksine tüm numune gruplarında kuru duruma kıyasla yaklaşık 2 Shore D'lik sistematik bir sertlik artışı meydana gelmiştir. Su emme sonrasında da en yüksek sertlik performansını 64 Shore D ile %30 cam tozu içeren numune sergilemiştir. Bu sonucun geri dönüştürülmüş polipropilen matrisinde meydana gelen mikroyapısal yeniden düzenlenme ve dolgu-matris ara yüzeyindeki değişimlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra Shore D testinin yüzey direncine duyarlı olması nedeniyle, dolgu partiküllerinin oluşturduğu yüzey sertleşmesi de ölçülen sertlik değerlerinin artmasına katkıda bulunmuş olabilir.
- Yüzey sertliğini geliştirme ve çevresel etkenlere karşı koruma noktasında atık cam tozunun, ceviz kabuğu tozuna kıyasla daha efektif bir takviye elemanı olduğu doğrulanmıştır.

KAYNAKÇA

[1] S. Mekideche, M. Rokbi, Z. E. A. Rahmouni, R. Phiri, S. Mavinkere Rangappa, ve S. Siengchin, "Manufacture and characterization of lightweight sand-plastic composites made of plastic waste and sand: Effect of sand types", *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, c. 8, sy. 1, ss. 53-65, Oca. 2025, doi: 10.1016/j.ijlmm.2024.08.004.

[2] C. Echeverria, F. Pahlevani, V. Gaikwad, ve V. Sahajwalla, "The effect of microstructure, filler load and surface adhesion of marine bio-fillers, in the performance of

Hybrid Wood-Polypropylene Particulate Bio-composite”, *J. Clean. Prod.*, c. 154, ss. 284-294, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.020.

[3] S. Thangaraj, Gm. Pradeep, Ms. Heaven Dani, S. Mayakannan, ve A. Benham, “Experimental investigations on tensile and compressive properties of nano alumina and arecanut shell powder reinforced polypropylene hybrid composites”, *Mater. Today Proc.*, c. 68, ss. 2243-2248, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.442.

[4] G. Ahmetli, S. Kocaman, U. Soydal, B. Koçak, N. Özmeral, ve N. Musayev, “Appraisal of inorganic and lignocellulosic organic shell wastes as a green filler in epoxy-based hybrid composites”, *Int. J. Biol. Macromol.*, c. 284, s. 137975, Oca. 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137975.

[5] İ. Kartal ve M. Tunç, “Investigation of Mechanical Properties of Oak Sawdust Filled Polyester Composites”, *Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng.*, c. 10, sy. 3, Tem. 2024, doi: 10.22399/ijcesen.245.

[6] M. Zahedi, H. Pirayesh, H. Khanjanzadeh, ve M. M. Tabar, “Organo-modified montmorillonite reinforced walnut shell/polypropylene composites”, *Mater. Des.*, c. 51, ss. 803-809, Eki. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.05.007.

[7] “<https://www.fas.usda.gov/data/production/tree%20nuts>”.

[8] T. Z. Sheikh, F. A. Mozumdar, M. R. Karim, ve Q. Ahsan, “Investigation of mechanical, morphological and thermal properties of waste glass powder and wood flour reinforced polypropylene composite”, *Heliyon*, c. 11, sy. 1, s. e41352, Oca. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41352.

[9] H. Deng, C. T. Reynolds, N. O. Cabrera, N.-M. Barkoula, B. Alcock, ve T. Peijs, “The water absorption behaviour of all-polypropylene composites and its effect on mechanical properties”, *Compos. Part B Eng.*, c. 41, sy. 4, ss. 268-275, Haz. 2010, doi: 10.1016/j.compositesb.2010.02.007.

[10] M. Lubis vd., “Modified corn stem powder as a polypropylene composite filler with the addition of maleic anhydride-g-polypropylene”, *Res.*, c. 2, sy. 4, s. 100755, Ara. 2025, doi: 10.1016/j.nexres.2025.100755.

[11] I. O. Oladele, J. O. Ajileye, S. R. Oke, O. O. Daramola, ve O. A. Adewumi, “Thermal and water absorption properties of bio-synthetic hybrid reinforced polypropylene composites”, *Mater. Today Proc.*, c. 38, ss. 994-998, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.580.

[12] K. Ray vd., “Glass/jute/sisal fiber reinforced hybrid polypropylene polymer composites: Fabrication and analysis of mechanical and water absorption properties”, *Mater. Today Proc.*, c. 33, ss. 5273-5278, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.964.

[13] G. Bujjibabu, V. C. Das, M. Ramakrishna, ve K. Nagarjuna, “Mechanical And Water Absorption Behavior Of Natural Fibers Reinforced Polypropylene Hybrid Composites”, *Mater. Today Proc.*, c. 5, sy. 5, ss. 12249-12256, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.202.

[14] F. Mulana, M. P. Aulia, Azwar, ve S. Aprilia, “Coconut fiber and fly ash polymer hybrid composite treated silane coupling agent: Study on morphology, physical, mechanical,

and thermal properties”, *South Afr. J. Chem. Eng.*, c. 50, ss. 10-19, Eki. 2024, doi: 10.1016/j.sajce.2024.07.008.

[15] A. Donmez Cavdar, S. Boran Torun, B. Avci, ve F. Mengeloglu, “The engineering properties of polypropylene hybrid composites reinforced with lignin and zeolite”, *J. Mater. Res. Technol.*, c. 38, ss. 2666-2674, Eyl. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.08.100.

ATIK CAM VE FINDIK KABUĞU DOLGULU VINİLESTER ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Doç. Dr. İlyas Kartal

Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 34722,
İstanbul-TÜRKİYE, ilyaskartal@marmara.edu.tr - ORCID: 0000-0001-9677-477X

Edanur Gürbüz

Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 34722,
İstanbul-TÜRKİYE, edanurgrbz20@gmail.com - ORCID: 0009-0002-2337-1632

ÖZET

Bu çalışmada, vinilester matrisli kompozitlerde fındık kabuğu ve atık camın hibrit dolgu olarak kullanımının mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Fındık kabuğu ve atık cam, çevresel açıdan önemli miktarlarda oluşan ve değerlendirilmesi gereken atık kaynaklarıdır. Bu atıkların polimer kompozitlerde kullanılması hem sürdürülebilir malzeme üretimine katkı sağlamakta hem de atık yönetimi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Çalışmada 0–50 µm tane boyutuna sahip fındık kabuğu ve atık cam tozları belirli oranlarda vinilester reçine içerisine ilave edilerek kompozit numuneler üretilmiştir. Numuneler üzerinde Izod darbe testi, Shore D sertlik ölçümleri, SEM görüntüleme, su emme testleri gerçekleştirilmiştir. Fındık kabuğunun kompozite hafiflik ve tokluk kazandırması, atık camın ise rijitlik, sertlik ve aşınma direncini artırması beklenmektedir.

Hibrit sistem sayesinde her iki dolgunun üstün özelliklerinin bir araya getirilerek dengeli mekanik performans elde edilmesi amaçlanmaktadır. Elde edilen sonuçların, tarımsal ve endüstriyel atıkların yüksek katma değerli kompozit malzemelere dönüştürülmesine yönelik çalışmalara katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Vinilester kompozitler, fındık kabuğu, atık cam, hibrit kompozit, sürdürülebilir malzemeler.

1.GİRİŞ

Kompozit malzemeler, fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı iki veya daha fazla bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok fazlı mühendislik malzemeleridir. Bu malzemelerde matris fazı yapısal bütünlüğü sağlarken, takviye fazı mekanik dayanım, rijitlik ve fiziksel özelliklerin geliştirilmesinde önemli rol oynar. Geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek özgül dayanım, düşük yoğunluk ve tasarlanabilir özellikler sunmaları nedeniyle kompozit malzemeler havacılık, otomotiv, denizcilik ve yapı sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. [1–3]

Son yıllarda sürdürülebilir üretim anlayışının yaygınlaşmasıyla birlikte kompozit malzemelerde doğal ve geri dönüştürülmüş dolgu kullanımına yönelik çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. Tarımsal ve endüstriyel atıkların kompozit üretiminde değerlendirilmesi; atık miktarının azaltılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel etkilerin sınırlandırılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle araştırmacılar yenilenebilir ve düşük maliyetli kaynakların polimer matrislerde kullanımına yoğun ilgi göstermektedir. [4,8,10]

Fındık kabuğu, lignoselülozik yapıya sahip önemli bir tarımsal atık olup selüloz, hemiselüloz ve lignin içermektedir. Dünya fındık üretiminin büyük bölümü Türkiye tarafından gerçekleştirilmekte ve her yıl önemli miktarda fındık kabuğu atığı ortaya çıkmaktadır. Düşük yoğunluğu, yenilenebilir olması ve ekonomik avantajları sayesinde fındık kabuğu kompozitlerde doğal dolgu malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Ancak hidrofilik karakteri nedeniyle yüksek oranlarda kullanıldığında su absorpsiyonunu artırabilmekte ve mekanik özelliklerde azalmaya neden olabilmektedir. [4–7,14,15]

Atık cam ise geri dönüşüm potansiyeli yüksek olmasına rağmen önemli miktarlarda depolama alanlarına gönderilen endüstriyel atıklardan biridir. Yüksek silika içeriği sayesinde sertlik, rijitlik ve aşınma direnci gibi özelliklerin geliştirilmesinde etkili bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Mikron boyutlara öğütülen atık cam tozları polimer kompozitlerde sertlik ve boyutsal kararlılığı artırırken, yüksek oranlarda kullanıldığında malzemenin gevrek davranmasına neden olabilmektedir. [11–13]

Doğal ve inorganik dolguların birlikte kullanıldığı hibrit kompozit sistemler, son yıllarda araştırmacıların üzerinde yoğunlaştığı çalışma alanlarından biri haline gelmiştir. Hibrit sistemlerde farklı karaktere sahip dolgu malzemeleri bir araya getirilerek her bir fazın avantajlarından yararlanılması amaçlanmaktadır. Fındık kabuğunun sağladığı hafiflik ve enerji sönümleme kapasitesi ile atık camın kazandırdığı sertlik ve rijitliğin birlikte kullanılması sayesinde daha dengeli mekanik özelliklere sahip kompozitler elde edilebilmektedir. [8,10,12]

Vinilester reçineler, epoksi reçinelerin yüksek mekanik performansını ve polyester reçinelerin işlenebilirlik avantajlarını bir arada sunan önemli termoset matris sistemleridir. Düşük büzülme oranı, yüksek korozyon direnci ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında tercih edilmektedir. Bununla birlikte atık cam ve fındık kabuğu kullanılarak üretilen vinilester esaslı hibrit kompozitler üzerine yapılan çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır. [2,3,8,12]

Bu çalışmada, çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımı doğrultusunda atık cam ve fındık kabuğunun vinilester matris içerisinde tekil ve hibrit dolgu olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Üretilen kompozitlerin Shore D sertlik, Izod darbe dayanımı, su absorpsiyonu ve SEM analizleri gerçekleştirilmiş; dolgu türü ve oranının kompozit performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Böylece tarımsal ve endüstriyel atıkların yüksek katma değerli kompozit malzemelere dönüştürülmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır. [8,10–13]

Bledzki vd. [4] polipropilen matris içerisinde farklı oranlarda fındık kabuğu unu kullanarak kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada dolgu miktarının artmasıyla elastisite modülü ve eğilme dayanımında artış gözlenmiştir. Bununla birlikte yüksek dolgu oranlarında çekme ve darbe dayanımında azalma meydana geldiği rapor edilmiştir.

Demir vd. [7] fındık kabuğu ununun polipropilen kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, uygun parçacık boyutlarının kompozit performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Ancak yüksek dolgu miktarlarında parçacık kümelenmeleri nedeniyle bazı mekanik özelliklerde düşüş olduğu belirlenmiştir.

Çetin ve Özmen [6], fındık kabuğu dolgusunun epoksi ve polyester esaslı termoset kompozitlerde kullanımını incelemiştir. Araştırmacılar, doğal dolgunun reçine içerisinde başarılı şekilde dağılabildiğini ve sertlik değerlerini artırdığını bildirmiştir. Buna karşın yüksek dolgu oranlarında boşluk oluşumları nedeniyle mukavemet kayıpları gözlenmiştir.

Valasek vd. [11] çalışmalarında geri dönüştürülmüş cam tozları epoksi esaslı kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Araştırma sonucunda cam tozu ilavesinin aşınma direnci ve eğilme modülü üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Özellikle %20 seviyesindeki cam katkısının mekanik performansta önemli iyileşmeler sağladığı rapor edilmiştir.

Raza ve Westwood [13], atık cam dolgulu termoset kompozitlerde silan yüzey işleminin etkilerini incelemiştir. Silan modifikasyonu sayesinde cam parçacıkları ile matris arasındaki bağ kuvvetinin arttığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda çekme ve eğilme dayanımlarında belirgin iyileşmeler elde edilmiştir.

Srivastava ve Pawar [12], atık cam tozu katkılı epoksi kompozitlerin mekanik davranışlarını araştırmıştır. Cam tozunun sertlik ve rijitliği artırdığı tespit edilmiştir. Buna karşılık yüksek dolgu oranlarında gevrek davranışın arttığı ve darbe dayanımının düştüğü bildirilmiştir.

Muller ve Valasek [10], fındık kabuğu mikropartikülleri içeren polimer kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada doğal dolgu kullanımının aşınma direncini artırdığı ve yeterli mekanik performans sağladığı belirlenmiştir. Araştırmacılar, fındık kabuğunun sürdürülebilir kompozit üretiminde değerlendirilebilecek önemli bir kaynak olduğunu vurgulamıştır.

Gürü vd. [8] tarımsal atık dolgulu vinilester kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmıştır. Sonuçlar, doğal atıkların vinilester reçine içerisinde başarılı şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca dolgu miktarı ve dağılımının kompozit performansında kritik rol oynadığı belirtilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada matris malzemesi olarak vinilester, dolgu malzemesi olarak atık cam tozu, fındık kabuğu tozu ve sertleştirici olarak metil etil keton peroksit kullanılmıştır. Atık cam tozunun boyutları 50 µm, fındık kabuğu tozu 50 µm boyutundadır. Bu çalışmada kullanılan vinilester reçine, yüksek mekanik dayanım ve iyi kimyasal direnç özellikleri nedeniyle matris malzemesi olarak tercih edilmiştir. Ayrıca düşük viskozitesi sayesinde atık cam ve fındık kabuğu partiküllerinin reçine içerisinde daha homojen dağılmasına katkı sağlamıştır.

2.2. Numunelerin Hazırlanması

Çizelge 1’de belirtildiği gibi vinilester reçine içerisine belli oranlarda fındık kabuğu tozu, atık cam tozu ve sertleştirici eklenmiştir. Bu numuneler numaralarla gösterilmiş ve içerikleri tabloda belirtilmiştir. Çalışmada fındık kabuğu tozu FK, atık cam tozu CA şeklinde belirtilmiştir.

Çizelge 1. Fındık Kabuğu ve Cam Atık Dolgulu Kompozit Malzemenin İçeriği

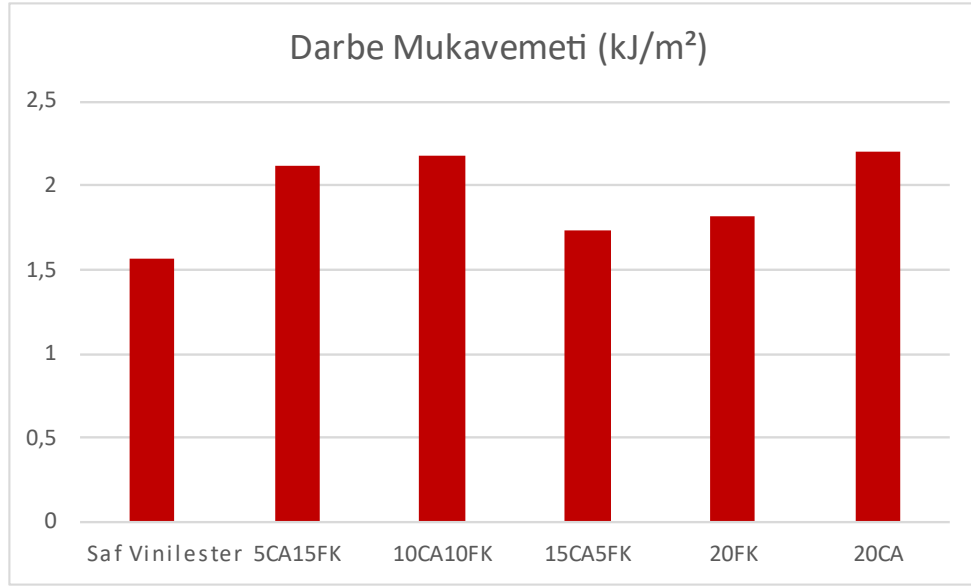
Fındık Kabuğu (FK) (ağırlıkça, %)	Cam Atık (CA) (ağırlıkça, %)	Reçine Oranı	Sertleştirici Oranı, %
0	0	100	1
5	15	100	1
20	0	100	1
10	10	100	1
15	5	100	1
0	20	100	1

Şekil 1’deki Teflon kalıba dökülmüş numunelerin fiziksel görüntüsü gösterilmiştir.



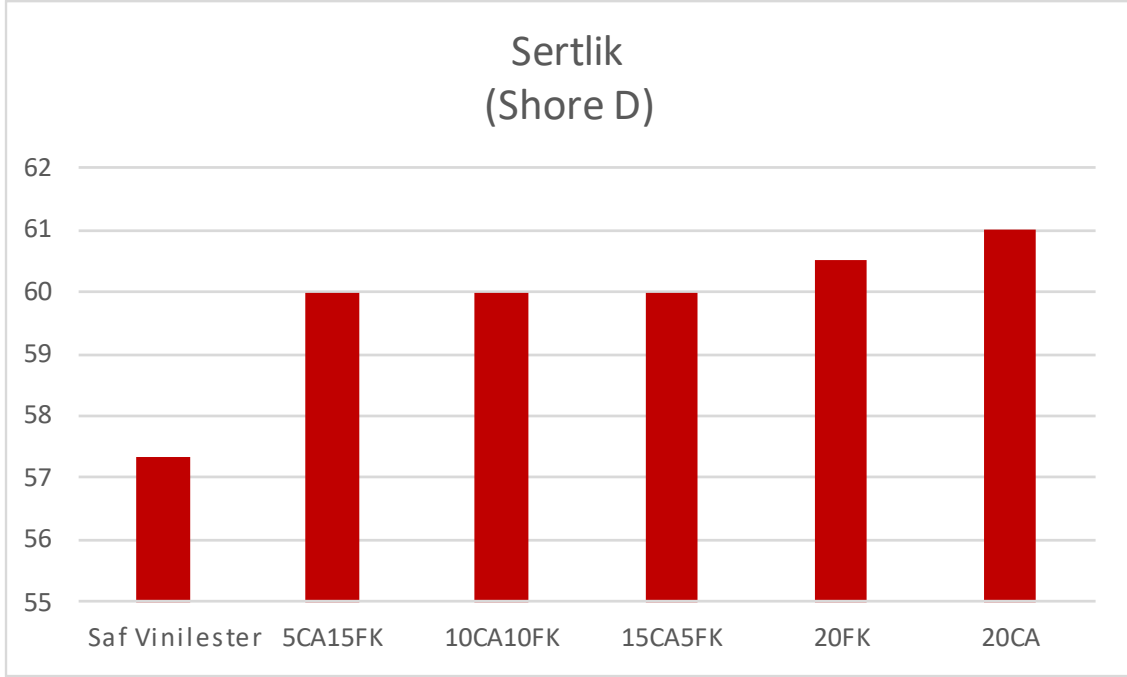
Şekil 1. Teflon Kalıba Dökülmüş Numuneler

3. BULGULAR VE TARTIŞMA



Şekil 2. Atık cam ve fındık kabuğu dolgulu vinilester kompozitlerin Izod darbe dayanımı sonuçları

Şekil 2'te Atık cam ve fındık kabuğu dolgulu vinilester kompozitlerin Izod darbe dayanımı sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde saf vinilester numunesinin darbe dayanımının hibrit kompozit numunelere göre daha düşük olduğu görülmektedir. En yüksek darbe dayanımı değerleri 5CA15FK ve 10CA10FK kompozisyonlarında elde edilmiştir. Bu durum, fındık kabuğunun çatlak ilerlemesini yavaşlatan ve enerji yutma kapasitesini artıran lignoselülozik yapısı ile cam atığın rijit yapısının birlikte oluşturduğu hibritleşme etkisiyle açıklanabilir. Cam atık oranının %20 seviyesine çıkarıldığı numunelerde ise darbe dayanımında düşüş gözlenmiştir. Sert ve kırılgan yapıya sahip cam partikülleri, yüksek oranlarda kullanıldığında gerilim yığılma bölgeleri oluşturarak çatlak ilerlemesini hızlandırabilmektedir. Sonuç olarak hibrit sistemlerin tekil dolgu sistemlerine göre daha yüksek darbe dayanımı sağladığı ve özellikle 10CA10FK kompozisyonunun darbe yükleri altında optimum performans sunduğu belirlenmiştir.

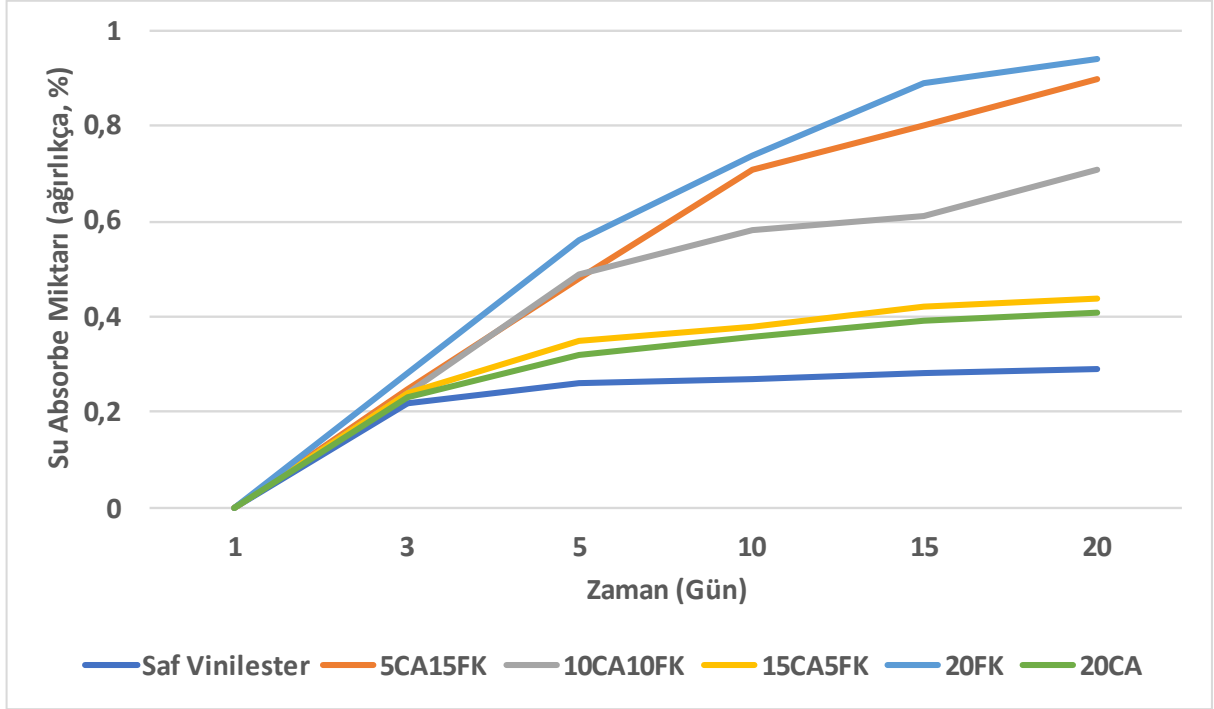


Şekil 3. Atık cam ve fındık kabuğu dolgulu vinilester kompozitlerin Shore D sertlik sonuçları

Şekil 3'te Atık cam ve fındık kabuğu dolgulu vinilester kompozitlerin Shore D sertlik sonuçları gösterilmektedir. Shore D sertlik sonuçları değerlendirildiğinde, dolgu ilavesi yapılan tüm kompozitlerde saf vinilester numunesine kıyasla sertlik artışı meydana geldiği görülmektedir. Dolguların polimer matris içerisindeki zincir hareketlerini sınırlandırması ve deformasyona karşı direnç oluşturması bu artışın temel nedenidir.

Fındık kabuğu içeren numunelerde sertlik değerlerinin yükselmesi, lignin bakımından zengin yapının matrisi güçlendirmesiyle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte hibrit numunelerde cam atığın katkısıyla sertlik ve rijitlik özelliklerinin daha dengeli hale geldiği görülmektedir. Elde edilen veriler, hibrit kompozitlerin yalnızca darbe dayanımı açısından değil sertlik bakımından da avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

En yüksek sertlik değeri 61 Shore D ile %20 cam atık içeren numunede elde edilirken, hibrit kompozitlerin sertlik değerlerinin 60 Shore D civarında kümelendiği belirlenmiştir. Bu sonuç, cam atık partiküllerinin yüksek sertlik ve rijitlik karakteri sayesinde yüzey deformasyonlarını daha etkin şekilde sınırlandırmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, hibrit kompozitlerin sertlik değerlerinin saf vinilestere göre yaklaşık %4–6 oranında artış göstermesi, fındık kabuğu ve cam atığın birlikte kullanımının yüzey direncini artırırken malzemenin diğer mekanik özelliklerini de koruyabildiğini göstermektedir. Dolayısıyla sertlik sonuçları, hibrit dolgu sistemlerinin yalnızca rijitliği artırmakla kalmayıp aynı zamanda dengeli bir mekanik performans oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

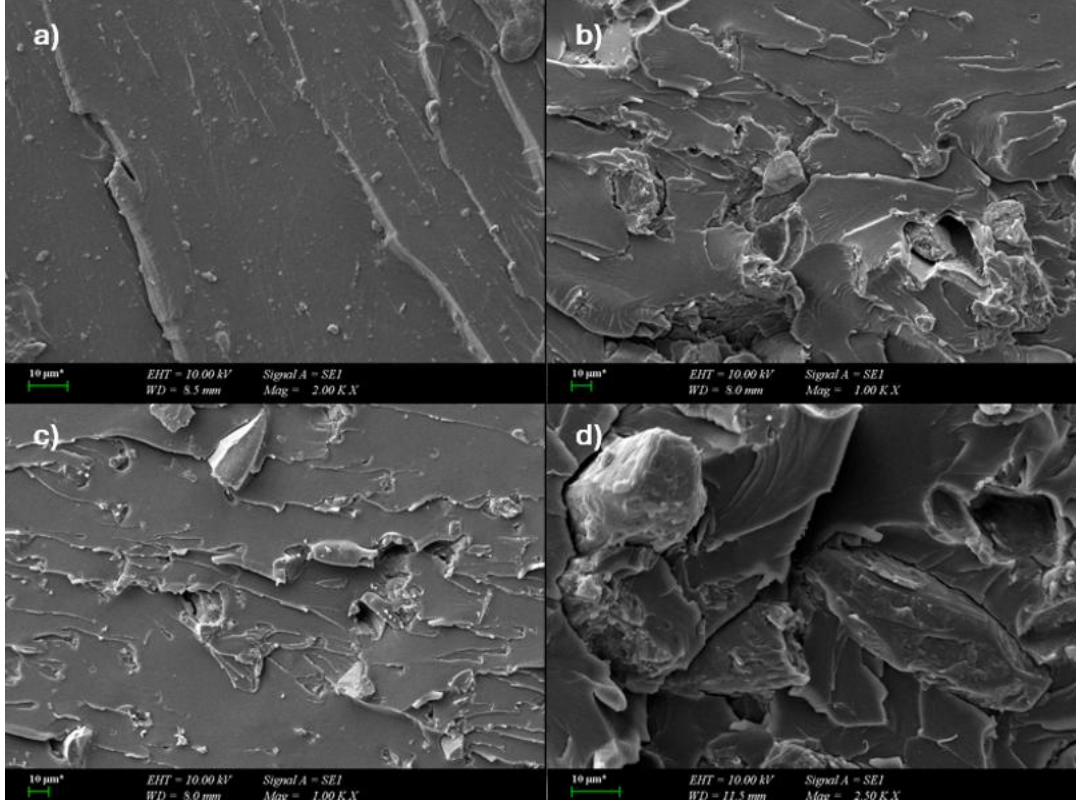


Şekil 4. Atık cam ve fındık kabuğu dolgulu vinilester kompozitlerin su emme davranışları

Şekil 4'te Atık cam ve fındık kabuğu dolgulu vinilester kompozitlerin su emme davranışları gösterilmektedir. Su emme sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerde su absorpsiyon miktarının zamanla arttığı ve deney süresinin sonuna doğru dengeye yaklaşma eğilimi gösterdiği görülmektedir. En yüksek su absorpsiyonu %20 fındık kabuğu içeren kompozitte elde edilirken, saf vinilester numunesi en düşük su alma davranışını sergilemiştir. Bu durum, fındık kabuğunun yapısında bulunan selüloz ve hemiselüloz bileşenlerinin hidrofilik karakterinden kaynaklanmaktadır.

Cam atık katkısının ise su absorpsiyonunu azaltıcı yönde etkilediği görülmüştür. Özellikle 10CA10FK hibrit kompozisyonu, deney süresi boyunca daha kararlı bir su emme davranışı göstererek hibrit sistemler içerisinde en dengeli performansı sergilemiştir. Bu durum, cam partiküllerinin kompozit yapı içerisindeki boşlukları azaltması ve suyun ilerleyebileceği kapiler yolları sınırlandırması ile açıklanabilir. Ayrıca cam ve fındık kabuğunun eşit oranlarda kullanılması, doğal dolgunun neden olduğu hidrofilik etkinin dengelenmesine katkı sağlamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, su absorpsiyon sonuçları hibrit dolgu kullanımının yalnızca mekanik özellikleri değil, kompozitlerin çevresel dayanımını da olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Özellikle 10CA10FK kompozisyonu, su direnci bakımından daha kararlı bir yapı sergileyerek uygulama potansiyeli yüksek bir kompozit formülasyonu olarak öne çıkmıştır.



Şekil 5. a) Saf Vinilester SEM görüntüsü **b)** %10 Fındık Kabuğu %10 Cam Atık dolgulu kompozit numunenin SEM görüntüsü **c)** %20 Cam Atık dolgulu kompozit numunenin SEM görüntüsü **d)** %20 Fındık Kabuğu dolgulu kompozit numunenin SEM görüntüsü

Şekil 5'te a)'da Saf Vinilester SEM görüntüsü b)'de %10 Fındık Kabuğu %10 Cam Atık dolgulu kompozit numunenin SEM görüntüsü c)'de %20 Cam Atık dolgulu kompozit numunenin SEM görüntüsü ve d)'de %20 Fındık Kabuğu dolgulu kompozit numunenin SEM görüntüsü sunulmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde, saf vinilester numunesinin daha düzgün ve homojen bir kırılma yüzeyi sergilediği görülmektedir. Kırılma yüzeyinin görece pürüzsüz olması, çatlakların belirli bir yol boyunca ilerlediğini ve malzemenin enerji absorplama kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu gözlem, saf vinilester numunesinde elde edilen düşük darbe dayanımı sonuçları ile uyumlu bulunmuştur.

%10 fındık kabuğu ve %10 cam atık içeren hibrit kompozit numunesinde ise kırılma yüzeyinin daha pürüzlü ve karmaşık bir yapı kazandığı görülmektedir. Dolgu parçacıklarının matris içerisinde daha homojen dağıldığı, çatlak ilerleme yönlerinin değiştiği ve kırılma sırasında daha fazla enerji tüketildiği anlaşılmaktadır. Bu durum, hibrit kompozitlerde ölçülen yüksek darbe dayanımı değerlerini desteklemekte olup, atık cam ve fındık kabuğunun birlikte kullanımının daha etkin bir yük transfer mekanizması oluşturduğunu göstermektedir.

Yalnızca cam atık içeren numunelerde bazı bölgelerde arayüzey ayrılmaları ve mikro boşluklar gözlenirken, yalnızca fındık kabuğu içeren numunelerde parçacık kümelenmeleri ve dolgu yoğunlaşmaları tespit edilmiştir. Buna karşın hibrit kompozitte iki farklı dolgunun birbirini tamamlaması sayesinde daha düzenli ve kararlı bir mikroyapı oluştuğu belirlenmiştir. Genel olarak SEM sonuçları, 10CA10FK kompozisyonunun daha homojen bir yapı sergilediğini ve mekanik performans açısından en dengeli kompozisyonlardan biri olduğunu ortaya koymuştur.

4. SONUÇLAR

Bu araştırmada, atık cam ve fındık kabuğunun vinilester reçine içerisinde farklı oranlarda kullanılmasıyla üretilen kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel performansları incelenmiştir. Elde edilen bulgular, dolgu türü ve dolgu oranının kompozit davranışı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Yapılan testler sonucunda, endüstriyel ve tarımsal kaynaklı atıkların kompozit üretiminde etkin şekilde değerlendirilebileceği ortaya konulmuştur.

Izod darbe dayanımı sonuçlarına göre, en yüksek performans hibrit kompozitlerde elde edilmiştir. Özellikle %15 fındık kabuğu-%5 cam atık ve %10 fındık kabuğu-%10 cam atık içeren numuneler, diğer kompozisyonlara kıyasla daha yüksek enerji absorplama kapasitesi göstermiştir. Bu durum, sert cam partiküllerinin kompozite kazandırdığı rijitliğin, fındık kabuğunun çatlak ilerlemesini yavaşlatan yapısıyla birleşmesi sonucunda ortaya çıkan hibritleşme etkisinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık yalnızca yüksek oranda cam atık içeren kompozitlerde daha kırılğan bir davranış gözlenmiş ve darbe dayanımında düşüş meydana gelmiştir.

Shore D sertlik sonuçları, tüm dolgulu kompozitlerin saf vinilestere göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaştığını göstermiştir. Dolgu parçacıklarının matris içerisindeki hareketliliği sınırlandırması ve yük altında deformasyon direncini artırması bu yükselişte etkili olmuştur. Sertlik bakımından gerek cam atık gerekse fındık kabuğu katkılı kompozitlerde artış gözlenmekle birlikte, hibrit sistemlerin mekanik özellikler açısından daha dengeli bir yapı sunduğu görülmüştür. Bu sonuç, kompozit performansını yalnızca sertlik açısından değil, diğer mekanik özelliklerle birlikte değerlendirmek gerektiğini ortaya koymaktadır.

Su emme testleri incelendiğinde, fındık kabuğu oranının artmasıyla birlikte kompozitlerin su absorplama eğiliminin yükseldiği belirlenmiştir. Lignoselülozik yapıdaki fındık kabuğunun hidrofilik karakteri bu davranışın temel nedenidir. Buna karşılık cam atık ilavesinin su absorpsiyonunu azaltıcı etkide bulunduğu görülmüştür. Özellikle %10 cam atık-%10 fındık kabuğu içeren hibrit kompozisyonda, su emme davranışının daha dengeli olduğu ve kompozit yapının çevresel etkilere karşı daha kararlı bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, cam partiküllerinin yapı içerisindeki boşlukları azaltarak suyun ilerlemesini sınırlandırmasıyla ilişkilendirilmektedir.

SEM incelemeleri, mekanik testlerden elde edilen sonuçları destekleyen önemli mikroyapısal bulgular ortaya koymuştur. Saf vinilester numunesinde daha düzgün ve gevrek karakterli kırılma yüzeyleri gözlenirken, hibrit kompozitlerde daha karmaşık ve pürüzlü bir yapı olduğu belirlenmiştir. Özellikle %10 cam atık-%10 fındık kabuğu içeren numunede dolgu dağılımının daha homojen olduğu, çatlakların ilerleme yönlerinin değiştirildiği ve kırılma enerjisinin daha geniş bir alana yayıldığı görülmüştür. Buna karşılık yalnızca cam atık içeren numunelerde yer yer arayüzey ayrılmaları ve mikro boşluklar gözlenirken, yüksek oranda fındık kabuğu içeren kompozitlerde parçacık kümelenmelerinin olduğu belirlenmiştir. Bu gözlemler, hibrit sistemlerin daha etkili bir yük transfer mekanizması geliştirdiğini göstermektedir.

Tüm deneysel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, %10 cam atık ve %10 fındık kabuğu içeren hibrit kompozisyonun en dengeli performansı sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu

kompozisyon; darbe dayanımı, sertlik, su direnci ve mikroyapısal bütünlük açısından diğer formülasyonlara göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Elde edilen bulgular, tarımsal atık olan fındık kabuğu ile endüstriyel atık olan camın birlikte değerlendirilmesinin yalnızca çevresel açıdan değil, mühendislik performansı bakımından da önemli avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak bu tür hibrit kompozitlerin otomotiv, yapı ve genel mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek sürdürülebilir alternatif malzemeler arasında yer alabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, atık cam ve fındık kabuğu gibi düşük maliyetli atık kaynakların yüksek katma değerli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir. Elde edilen bulgular, sürdürülebilir malzeme geliştirme çalışmalarına katkı sağlamakla birlikte, otomotiv, yapı, denizcilik ve genel mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek çevre dostu kompozitlerin geliştirilmesi açısından da önemli bir temel oluşturmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda yüzey modifikasyonu, farklı partikül boyutları ve farklı hibrit oranlarının incelenmesiyle kompozit performansının daha ileri seviyelere taşınabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Wiley, 2018.
- [2] Hull, D., & Clyne, T. W., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, 2019.
- [3] Gibson, R. F., *Principles of Composite Material Mechanics*, CRC Press, 2016.
- [4] Bledzki, A. K., Letman, M., Sperber, A., & Spicker, C., “Preparation and Properties of Hazelnut Shell Flour Reinforced Polypropylene Composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, 115(4), 2132–2141, 2010.
- [5] Copur, Y., Guler, C., Akgul, M., & Tascioglu, C., “Some Chemical Properties of Hazelnut Shell and its Suitability for Particleboard Production”, *Building and Environment*, 42(7), 2568–2572, 2007.
- [6] Çetin, N. S., & Özmen, N., “Utilization of Hazelnut Shell as a Bio-filler in Thermosetting Matrix (Epoxy and Polyester) Composites”, *Industrial Crops and Products*, 34(1), 988–994, 2011.
- [7] Demir, H., Atikler, U., Balköse, D., & Tihminlioğlu, F., “The Effect of Celite and Hazelnut Shell Flour on the Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene”, *Composites Part B: Engineering*, 37(6), 447–456, 2006.
- [8] Gürü, M., Bilici, İ. K., & Albas, A., “Development of Vinylester Composites Filled with Agricultural Wastes: Mechanical and Physical Evaluation”, *Journal of Composite Materials*, 48(12), 1489–1497, 2014.

- [9] Karagöz, İ., & Talk, F., “Fındık Kabuğu ve Talk Dolgulu Polipropilen Kompozitlerin Mekanik ve Isıl Özelliklerinin İncelenmesi”, *Journal of Polymeric Materials*, 32(3), 145–155, 2021.
- [10] Müller, M., & Valášek, P., “Effect of Hazelnut Shell Micro-particles on Mechanical and Wear Properties of Polymer Composites”, *Materials & Design*, 142, 222–231, 2018.
- [11] Valášek, P., Müller, M., & Proshlyakov, A., “Recycled Glass Particles as Filler of Polymer Composite Materials”, *Manufacturing Technology*, 14(3), 461–466, 2014.
- [12] Srivastava, V. K., & Pawar, A. S., “Effect of Waste Glass Powder on Mechanical Properties of Epoxy Resin Composites”, *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(12), 4652–4659, 2016.
- [13] Raza, M. A., & Westwood, A., “Influence of Silane Coupling Agent on the Mechanical and Thermal Properties of Waste Glass Powder Filled Thermosetting Composites”, *Polymer Engineering & Science*, 54(8), 1821–1830, 2014.
- [14] FAOSTAT, “Food and Agriculture Organization of the United Nations: Crop Production Statistics – Hazelnut”, Rome, Italy, 2024.
- [15] TÜİK, “Bitkisel Üretim İstatistikleri”, Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara, 2025.

O-RİNG KANALI ÇAPININ O-RİNG ÇAPINA OLAN ORANININ SIZDIRMAZLIK PERFORMANSINA ETKİSİ

Mak. Müh, Berkay Mendi

RTC TEC Bağlantı Elemanları A.Ş. , berkaymendi@rtc-tec.com – 0009-0003-5633-0762

ÖZET

Hızlı bağlantı elemanları, hava, su, yağ ve kimyasal gibi akışkanların güvenli şekilde transferini sağlayan ve endüstride birçok alanda yaygın olarak kullanılan mekanik bağlantı elemanlarıdır. Kullanım alanına bağlı olarak farklı performans özelliklerini sağlamaları beklenmektedir. Ancak akışkanların iletiminde kullanılan hızlı bağlantı elemanlarında öncelikle sızdırmazlık özelliği aranır. Yüksek basınç altında çalışan hızlı bağlantı elemanlarının sızdırması durumunda, işletmeye zaman, iş gücü ve maliyet açılarından olumsuz sonuçlar doğurabilmekte, bunun yanı sıra iş kazalarına da yol açabilmektedir. Bu durum göz önüne alındığında sızdırmazlık özelliği için çalışma konusu doğmuştur. Hızlı bağlantı elemanlarında bulunan O-ringler sızdırmazlık konusunda kritik rol almaktadır. Bu çalışmada hızlı bağlantı elemanları için sızdırmazlık özelliğinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. 5 adet farklı çapta O-ring kullanılarak ve farklı basınçlar altında yapılan çalışmada O-ring kanalı çapının O-ring çapına olan oranının sızdırmazlık performansına olan etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları, O-ring kanalı çapının O-ring çapına oranının sızdırmazlık performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Belirli bir oran aralığında sızıntının olmadığı ve sistem performansının iyileştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hızlı bağlantı elemanı, Sızdırmazlık, Sızdırmazlık Testi ve O-ring.

1. HIZLI BAĞLANTI ELEMANLARI

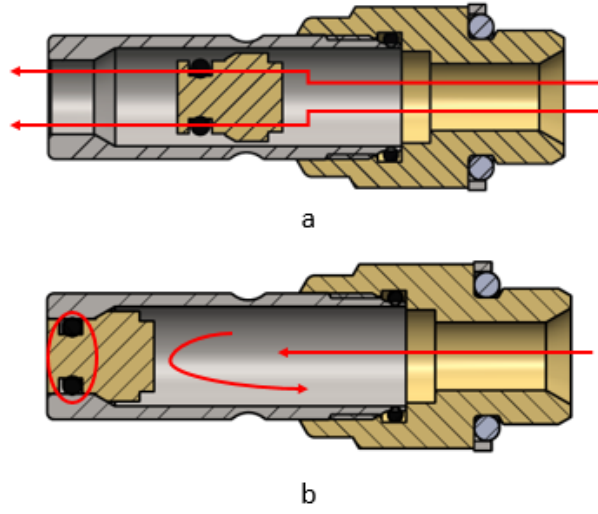
İçinden akışkan geçen, hortum ve boru bağlantılarının sık aralıklarla sökülüp takılması gereken uygulamalarda hızlı bağlantı elemanları önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlantı elemanları, açma ve kapama işlemlerini kısa sürede gerçekleştirmeye olanak tanıyarak işletme süreçlerinin daha verimli yürütülmesine katkıda bulunur. Görsel 1'de hızlı bağlantı elemanlarına ait örnekler görülmektedir. Bağlantı çevriminin sık olarak yapıldığı sistemlerde, hızlı bağlantı elemanlarının kullanılması işlem sürelerini azaltmakta ve buna bağlı olarak işletme maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Hidrolik sistemlerde ise kullanılan hızlı bağlantı elemanları akışkan kaybını en aza indirirken sisteme hava girişini engelleyerek hidrolik hattın güvenli ve hızlı bir şekilde ayrılıp yeniden bağlanmasını mümkün kılar. Bu özellikleri sayesinde söz konusu elemanlar, özellikle uzay istasyonları, fırlatma araçları ve benzeri ileri teknoloji gerektiren havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılan hidrolik sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir [1]. Hızlı bağlantı elemanları temel olarak basit çalışma prensibine sahip görünse de, endüstride farklı uygulama gereksinimlerini karşılayabilmek amacıyla yüksek hassasiyetle tasarlanıp üretilmektedir. Uzun yıllar farklı sektörlerde edinilen saha deneyimleri ve teknolojik gelişmeler sonucunda, çeşitli çalışma koşullarına uygun çok sayıda standart hızlı bağlantı elemanı geliştirilmiştir. Üretici veya marka farklılıkları bulunsa da, hızlı bağlantı elemanlarının yapısal prensibi büyük ölçüde benzerdir. Bu sistemler genel olarak "uç" (erkek bağlantı elemanı) ve "soket" (dişi bağlantı gövdesi) olmak üzere iki temel parçadan oluşmaktadır. Bağlantı sağlandığında bu iki bileşen, hat içerisindeki yüksek çalışma basıncına karşı sızdırmazlığı korurken aynı zamanda bağlantının eksenel yönde ayrılmasına neden olabilecek çekme kuvvetlerine karşı güvenli ve dayanıklı bir kilitleme mekanizması oluşturmaktadır [2].



Görsel 1. Hızlı bağlantı elemanı

1.1. Hızlı Bağlantı Elemanlarının İç Yapısı ve Çalışma Prensibi

Hızlı bağlantı elemanı soket parçası 7 bileşenden oluşur. Bunlar; soket gövdesi, soket arka parçası, dış kapak (bilezik), kilitleme bilyaları, valf, valf yayı ve sızdırmazlık elemanlarıdır (O-ringler). Soketin içinde dış kapağı ve valfi çalıştıran ve yay bulunmaktadır. Soketin iç kısmında ise erkek ucu çevreleyerek, erkek ucu yuvasında sabitleyen çelik kilitleme bilyaları bulunmaktadır. Soketin tam merkezinde valf bulunur. Hat ayrıldığında valf üzerindeki O-ring sayesinde akışı otomatik olarak keser. Uç sokete takıldığında ise valf üzerindeki O-ring sızdırmazlık sağlar. Hızlı bağlantı elemanı uç parçası 5 bileşenden oluşur. Bunlar; uç gövdesi, uç arka parçası, valf, valf yayı ve sızdırmazlık elemanlarıdır (O-ringler). Görsel 2.a' da gösterilen görselde hızlı bağlantı elemanı olan uç parçasının açık konumu gösterilmektedir. Valf açık iken kırmızı oklarla akış şematize edilmiştir. Görsel 2.b'de gösterilen görselde ise valfin kapalı olduğu konum gösterilmiştir. Kırmızı oklar ile şematize edilerek gösterilen konumda, valfin etrafından akış olmamaktadır.

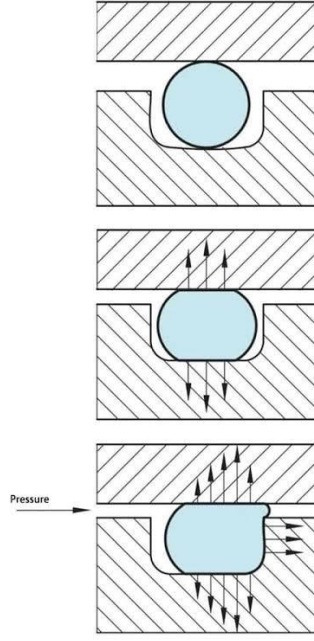


Görsel 2. a) Valf açık konum, b) Valf kapalı konum

1.2. O-ring Yapısı ve Çalışma Prensibi

Hidrolik sızdırmazlık elemanı olarak yaygınlaşmış olan O-ringler, başta otomotiv ve makine sektörü olmak üzere diğer endüstri kollarında da montaj kolaylığı, basit şekli ve düşük maliyeti nedeniyle oldukça yaygın bir şekilde kullanılan sızdırmazlık elemanlarıdır. Aynı zamanda hem statik hem de dinamik uygulamalarda kullanıma elverişlidir. O-ring kullanımının sağladığı başlıca avantajlar aşağıda verilmiştir.

- Maliyetinin nispeten düşük olması
- Aynı görevi yapan diğer bütün sızdırmazlık elemanlarından daha az hacim gerektirmesi
- Her iki yönde sızdırmazlık sağlaması
- Montaj işleminin deneyim gerektirmemesi, ters yönde monte edilmesinde tehlike yaratmaması
- O-ring kanalının işlenmesinin kolay olması
- Statik uygulamalarda contalara göre daha kaba yüzeyde kullanılabilmesi.



Görsel 3. Basınç altında O-ringin çalışma şekli [3].

O-ringlerde sızdırmazlık, montaj sırasında oluşan eksenel veya radyal sıkıştırma deformasyonu sayesinde sağlanmaktadır. Bu deformasyonun istenilen seviyede gerçekleşebilmesi, O-ring kanalının uygun geometrik özelliklerde tasarlanmasına bağlıdır. Elastomer malzemenin eski şekline dönme eğilimi, temas yüzeylerinde gerekli sızdırmazlık kuvvetini oluştururken, çalışma sırasında oluşan sistem basıncı da bu kuvveti artırarak sızdırmazlık performansını desteklemektedir.

Elastomer yapıya sahip O-ring malzemesi, yüksek viskoziteli bir akışkan gibi davranış gösterebilmektedir. Sızdırmazlık yüzeyleri ile kanal arasındaki boşluğun fazla olması veya çalışma basıncının malzemenin deformasyon kapasitesini aşması durumunda, O-ring malzemesinde ekstrüzyon (malzeme akması) meydana gelebilir. O-ringin güvenli şekilde çalışabileceği maksimum basınç değeri; malzeme sertliği, kanal boşluğu ve çalışma koşulları gibi parametrelere bağlıdır. Statik sızdırmazlık uygulamalarında ise ekstrüzyona neden olacak bir boşluk bulunmadığı sürece, O-ringlerin dayanabileceği basınç için belirli bir üst sınırdan söz etmek mümkün değildir. [4]

Görsel 3’ te görüldüğü üzere gelen akışkan basıncının O-ring tarafından nasıl muhafaza edildiği görülmektedir. Gelen kuvvetlere direnerek iki yüzey arasında sızdırmazlık sağlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada hızlı bağlantı elemanlarının sızdırmazlıklarını etkileyen en önemli faktör olan O-ring kanal çapının O-ring çapına olan oranının performansı araştırılmıştır. O-ring valfin üzerinde olup socketin uç kısmına baskı uygulayarak sızdırmazlık sağlamaktadır. O-ring çapının büyük ya da küçük olması valfin takıldığı kısım ile arasında boşluk olmasına sebep olmaktadır. Optimum O-ring çapı için 3 mm, 3,5 mm, 4 mm, 4,5 mm ve 5 mm olmak üzere 5 farklı boyutta O-ring kullanılmıştır. O-ringin takıldığı kanalın genişliği ise 4,5 mm seçilmiştir. Testler HTM Hidrolik Test Makinesi ile yapılmıştır. Yüksek basınçlı hızlı bağlantı elemanlarının sızdırmazlık testi bu makinede gerçekleştirilir. Görsel 3.' te Hidrolik Test Makinesi görülmektedir.



Görsel 4. Hidrolik Test Makinesi

O-ringlerin sızdırmazlık performanslarını ölçmek için 25 bar ve 50 bar olmak üzere 2 test yapılmıştır. 50 bar değeri ürünün maksimum çalışma basıncıdır. Görsel 4.'te 5 adet farklı boyutta O-ring içeren hızlı bağlantı elemanının test cihazındaki görseli görülmektedir. Hidrolik sızdırmazlık testi yapılırken test süresi saha tecrübeleri dikkate alınarak 5 saniye olarak belirlenmiştir ve test 5 kez tekrar edilmiştir. Test için belirlenen 5 adet hızlı bağlantı elemanı test cihazına valfleri kapalı konumda bağlanmıştır.



Görsel 5. Hızlı bağlantı elemanlarının testleri

Yapılan testlerde 25 bar yağ basıncı uygulanmış durumda hiçbir hızlı bağlantı elemanının yağ sızdırmadığı görülmüştür. 25 bar ve altında kullanılan uygulamalar için hızlı bağlantı elemanlarının sağlıklı çalıştığı ve O-ring çapının performansa doğrudan etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Çizelge 1.'de sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge 1. 25 Bar ile Yapılan Test Sonuçları

Referans	O-ring Kanal Çapı/O- ring çapı	O-ring Çapı [mm]	Yağ Basıncı [bar]	Test Durumu [Tekrar sayısı]	Sonuç
1	1,50	3	25	5	OK
2	1,29	3,5			OK
3	1,13	4			OK
4	1,00	4,5			OK
5	0,90	5			OK

50 bar ile yapılan testlerde 3 farklı O-ring çapındaki hızlı bağlantı elemanında yağın sızdığı sadece 2 farklı O-ring çapındaki hızlı bağlantı elemanında yağın sızdırılmadığı görülmüştür. 3 mm, 3.5 mm ve 5 mm O-ring çapındaki hızlı bağlantı elemanlarında yağ sızıntısı tespit

edilmiştir. 4 mm ve 4,5 mm O-ring çapındaki hızlı bağlantı elemanlarında ise yağ sızıntısı tespit edilmemiş ve testi başarıyla geçmiştir. Çizelge 2.'de sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge 2. 50 Bar ile Yapılan Test Sonuçları

Referans	O-ring Kanal Çapı/O- ring çapı	O-ring Çapı [mm]	Yağ Basıncı [bar]	Test Durumu [Tekrar sayısı]	Sonuç
1	1,50	3	50	5	NOK
2	1,29	3,5			NOK
3	1,13	4			OK
4	1,00	4,5			OK
5	0,90	5			NOK

3. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRME

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

25 Bar Test Sonucu Değerlendirmesi

- 25 bar ve altındaki basınçlarda çalışan hızlı bağlantı elemanlarında kullanılan O-ringler için çalışma aralığı geniş olup, 3 mm ve 5 mm aralığındaki O-ring çapına sahip hızlı bağlantı elemanları sorunsuz olarak çalışmaktadır.
- 25 bar çalışma basıncında gerçekleştirilen sızdırmazlık testlerinde 3 mm, 3,5 mm, 4 mm, 4,5 mm ve 5 mm O-ring çapına sahip tüm numunelerde herhangi bir sızıntı gözlemlenmemiştir.

Bunun temel nedeni, 25 bar basınç seviyesinin O-ring geometrileri arasındaki performans farkını ortaya çıkaracak kadar yüksek olmamasıdır. Dolayısıyla bu basınç seviyesinde tüm O-ring çapları yeterli sızdırmazlık performansı sergilemiş ve tasarımlar arasında karşılaştırma yapılmasına olanak sağlayacak ayırt edici bir sonuç elde edilememiştir. Bu nedenle O-ring kanal çapının sızdırmazlık performansına etkisini değerlendirebilmek amacıyla testler, ürünün tasarım kriteri olan maksimum çalışma basıncı olan 50 bar seviyesinde gerçekleştirilmiştir.

50 Bar Test Sonucu Değerlendirmesi

- 50 bar ile test edilen hızlı bağlantı elemanlarından yola çıkılarak 25 bar ve altında çalışacak hızlı bağlantı elemanları için 4 mm ve 4,5 mm O-ring çapı aralığındaki hızlı bağlantı elemanlarının yapılan testler ışığında daha uzun ömürlü olacağı sonucuna varılmıştır.
- 50 bar ile yapılan testlerde 4 mm ve 4,5 mm O-ring çapı aralığının sızdırmazlık testini başarıyla geçtiği belirlenmiştir. Buna karşın 3 mm, 3,5 mm ve 5 mm O-ring çapına sahip hızlı bağlantı elemanlarının sızdırmazlık testini geçemediği görülmüştür.

Bu ürün özelinde maksimum çalışma basıncı olan 50 bar altında gerçekleştirilen testler sonucunda, O-ring kanal çapının O-ring çapına oranının 1,00–1,13 arasında seçilmesinin ürünün güvenilir ve sağlıklı çalışması açısından en uygun aralık olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

[1] Sebastian, R. G., & Satheesh Kumar, S. (2014). Design of quick connect-disconnect hydraulic coupling. International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering, 3 (3), <https://www.researchgate.net/>

(Erişim tarihi: 08.07.2026)

[2] <https://catiaturk.com/arge/1740/pnomatik-hizli-hizli-baglanti-elemanlari-05.html>

(Erişim tarihi: 08.07.2026)

[3] <https://www.machinemfg.com/tr/O-ring-sealing-principles/>

(Erişim tarihi: 08.07.2026)

[4] <https://www.iskteknik.com/teknik/O-ring-sizdirmazlik-elemanlarinin-calisma-sekli-veavantajlari>

(Erişim tarihi: 08.07.2026)

NEVŞEHİR POMZA AGREGASI İLE ÜRETİLEN LİFLİ HAFİF HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İnş. Müh. Aminehatun TEZCAN

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi,

aminehatuntezcan@gmail.com –

ORCID No:0009-0008-9808-5650

Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

ismailatabey@nevsehir.edu.tr-

ORCID No: 0000-0002-7026-5579

ÖZET

Bu çalışmada, lif katkılı pomza agregası kullanılarak üretilen hafif harç karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda; farklı tane boyutlarına sahip pomza agregası içeren kontrol numuneleri ile çelik lif (ÇL), makromesh lif (ML) ve polipropilen lif (PL) katkılı harç numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelerin 7, 28 ve 56 günlük eğilme ve basınç dayanımları test edilerek, farklı lif türlerinin harç performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışımlarda çimento, su ve pomza miktarları sabit tutulmuş; farklı lifler ise hacimce %0,5 sabit oranında kullanılmıştır. Deney sonuçları, çelik lif içeren harçlar referans karışıma kıyasla eğilme dayanımında iyileşme gösterirken, tüm lif tiplerini içeren numuneler 56 günlük basınç dayanımında kontrol numunesine yakın değerler sergilemiştir. Sonuç olarak, pomza agregası içeren hafif harçlarda kür süresinin mekanik özellikleri pozitif yönde etkilediği, lif kullanımının çatlak kontrolü ve davranış iyileştirme açısından etkili olduğu; lif etkisini daha net ortaya koymak için çimento ve lif dozajlarını farklı oranlarda kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pomza agregası, hafif harç, polipropilen lif, çelik lif, makromesh lif

1.GİRİŞ

Yapı sektöründe son yıllarda öne çıkan temel araştırma alanlarından biri, daha hafif, enerji verimliliği yüksek sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesidir. Özellikle deprem riski taşıyan bölgelerde yapıların toplam ağırlığının azaltılması hem yapısal güvenlik hem de ekonomik açıdan önemli bir tasarım kriteri haline gelmiştir [1]. Bu kapsamda hafif harç ve hafif beton sistemleri, geleneksel betonlara alternatif olarak yoğun şekilde incelenmektedir.

Hafif beton üretiminde kullanılan agregalar, doğal veya yapay kaynaklı olabilmektedir. Doğal hafif agregalar içerisinde pomza, Türkiye’de yaygın bulunması ve düşük birim hacim ağırlıklı yapısı nedeniyle öne çıkmaktadır. Volkanik kökenli olan pomza, yüksek boşluk oranına sahip olması sayesinde düşük birim hacim ağırlığı ve ısı yalıtım özellikleri sunmaktadır. Buna karşılık, gözenekli yapısı nedeniyle mekanik dayanım üzerinde sınırlayıcı bir etki oluşturabileceği farklı araştırmalarda belirtilmiştir [2,3].

Literatürde pomza agregası içeren hafif betonların genel olarak daha düşük basınç dayanımı gösterdiği, ancak uygun tane dağılımı ve mineral katkıların kullanılması ile bu kayıpların azaltılabileceği ifade edilmektedir. Bununla birlikte bu tür sistemlerde dayanım-birim hacim ağırlık dengesi önemli bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir [4,5].

Çimento esaslı kompozitlerde mekanik performansı artırmak amacıyla lif kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Lif takviyesinin en önemli katkısı, matris içerisinde oluşan mikro çatlakların ilerlemesini kontrol altına alması ve çatlak köprüleme etkisi oluşturmaktır. Bu sayede özellikle eğilme yükleri altında daha sünek bir davranış elde edilmekte ve kırılma sonrası yük taşıma kapasitesi artmaktadır [6,7]. Polipropilen lifler plastik rötre kaynaklı çatlakların azaltılmasında etkili olurken, çelik ve makro sentetik lifler daha yüksek eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi sağlamaktadır [8,9].

Lif geometrisi, lif oranı ve matris ile aderans özellikleri, kompozit davranış üzerinde belirleyici faktörlerdir. Özellikle makro liflerin kullanıldığı sistemlerde, ani kırılma davranışının azaldığı ve çatlak oluşumunun daha kontrollü gerçekleştiği rapor edilmiştir [9,10]. Bu çalışmada pomza agregası içeren hafif harç karışımları farklı lif türleri ile birlikte üretilmiş ve 7,28,56 günlük eğilme ve basınç dayanımı açısından mekanik performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, lif katkısının hafif harçların mekanik davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL UYGULAMALAR

2.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42,5 R sınıfı Portland çimentosu kullanılmıştır. Hafif agrega olarak ise Nevşehir bölgesinden temin edilen farklı tane boyutlarına sahip pomza agregaları tercih edilmiştir. Pomza, düşük birim hacim ağırlığı ve yüksek boşluk oranı sayesinde hafif yapı malzemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan doğal bir agregadır. Bununla birlikte gözenekli yapısı nedeniyle yüksek su emme kapasitesine sahip olması harçların taze ve sertleşmiş hal özelliklerini etkileyebilmektedir [2,12].

Harçların mekanik performansını değerlendirmek amacıyla Polipropilen Lif (PL), Çelik Lif (ÇL) ve Makromesh Lif (ML) kullanılmıştır. Lif katkılarının çimento esaslı kompozitlerde çatlak oluşumunu sınırlandırdığı, yük aktarımını iyileştirdiği ve özellikle eğilme davranışına olumlu katkı sağladığı bilinmektedir [6,13]. Çalışmada kullanılan lif türlerine ait görseller Görsel 1’ de verilmiştir. Polipropilen lifler özellikle rötre kaynaklı mikro çatlakları sınırlandırılmasında etkili olduğu, çelik liflerin yüksek elastisite modülü sayesinde yük transferlerine katkı sağlayarak eğilme performansını geliştirdiği bilinmektedir. Makromesh lifler ise daha uzun ve ağ benzeri yapıları sayesinde harç matrisi içerisinde çatlak köprüleme etkisi oluşturarak kompozit davranışa katkı sağlayabilmektedir [9,14].



Görsel 1. A) Polipropilen Lif – b) Macromesh Lif – c) Çelik Lif

Kullanılan pomza agregalarının fiziksel özellikleri Çizelge 1’ de verilmiştir. Çizelge 1 incelendiğinde pomza agregalarının özgül ağırlık değerlerinin 2,24-2,36 g/cm³ arasında değiştiği görülmektedir. Ayrıca tane boyutu arttıkça su emme oranının yükseldiği ve en yüksek su emme oranının %35 ile 4-8 mm tane boyutundaki pomza agregasında elde edildiği belirlenmiştir. Bu durum pomzanın gözenekli yapısından kaynaklanmakta olup karışım tasarımı ön doyurma işlemini gerekli kılmıştır.

Çizelge 1. Pomza Agregası Fiziksel Özellikleri

POMZA BOYUT (mm)	ÖZGÜL AĞIRLIK (gr/cm ³)	SU EMME ORANI (%)
0-0,5	2,36	29
0,5-2	2,35	30
2-4	2,32	31
4-8	2,24	35

2.2 Harç Karışımları

DeneySEL çalışma kapsamında biri kontrol olmak üzere toplam dört farklı hafif harç karışımı hazırlanmıştır. Lif içermeyen referans karışım K kodu ile tanımlanırken, polipropilen lif içeren

karışım PL, çelik lif içeren karışım ÇL ve makromesh lif içeren karışım ML olarak adlandırılmıştır.

Karışım tasarımında çimento miktarı, su miktarı ve pomza agrega oranları tüm serilerde sabit tutulmuş, yalnızca lif türü değiştirilerek lif katkısının mekanik özellikler üzerinde etkisi araştırılmıştır. Lif katkılı karışımlarda lifler hacimce %0,5 oranında kullanılmıştır.

Pomza agregalarının yüksek su emme kapasitesi nedeniyle agregalar karışım öncesinde yaklaşık 1 saat süreyle ön doyurma (142 g su) işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan karışımlara ait karışım oranları Çizelge 2’ de verilmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde tüm karışımlarda çimento, su ve pomza agrega sabit tutulduğu yalnızca lif türünün değiştiği görülmektedir.

Çizelge 2. Harç Karışım Oranları

KARIŞIM KODU	Çimento (gr)	Su (gr)	0-0,5 Pomza (gr)	0,5-2 Pomza (gr)	2-4 Pomza (gr)	4-8 Pomza (gr)	Lif Miktarı (gr)	Kıvam Suyu (gr)
K	300	150	116	138	91	110	0	142
PL	300	150	116	138	91	110	1.4	142
ÇL	300	150	116	138	91	110	11.8	142
ML	300	150	116	138	91	110	1.4	142

2.3 Deney Yöntemi

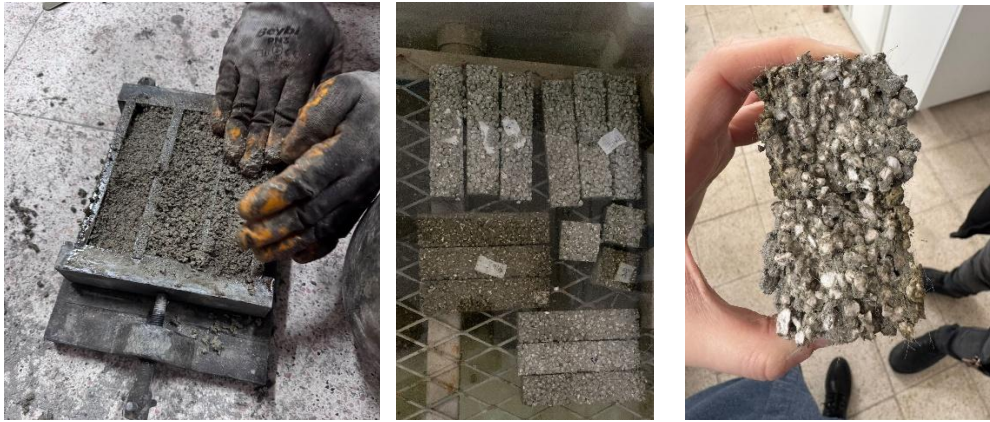
Deneyisel çalışmada kullanılan hafif harç numuneleri Çizelge 2’de verilen karışım oranlarına uygun olarak laboratuvar ortamında üretilmiştir. Karışım hazırlama işleminden önce, pomza agregalarının yüksek su emme kapasitesinin karışım suyu üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla agregalar 1 saat süreyle ön doyurma (142 g) işlemine tabi tutulmuştur. Harç karışımları, TS EN 196-1 standardında belirtilen karıştırma esasları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Karıştırma kabına öncelikle karışım suyu (150 g) alınmış, ardından çimento ilave edilerek homojen bir çimento hamuru elde edilmiştir. Daha sonra ön doyurma işleminden geçirilen pomza agregaları karışıma eklenmiş ve karıştırma işlemine devam edilmiştir. Lif katkılı serilerde ise polipropilen, çelik ve makromesh lifler karıştırma işleminin son aşamasında ilave edilerek homojen şekilde dağılmaları sağlanmıştır. Harç karışımının hazırlanma aşamaları Görsel 2’ de gösterilmektedir.



Görsel 2. Harç Karışım Hazırlama Aşaması

Hazırlanan taze harçlar 40×40×160 mm boyutlarındaki üç gözlü prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplama işlemi sırasında harç karışımına vibrasyon uygulanarak karışım içerisinde oluşabilecek hava boşlukları azaltılmıştır. Vibrasyon işlemi sonunda kalıp yüzeyleri düzeltiliş ve numuneler laboratuvar ortamında bir gün bekletilmiştir. Daha sonra numuneler kalıplardan çıkarılarak standart kür koşullarını sağlamak amacıyla kür havuzuna alınmıştır. Kür işlemi ve deney öncesi numunelere ait uygulamalar Görsel 3’de verilmiştir.

Numuneler 7,28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda mekanik deneyleri tabi tutulmuştur. Deneylerden elde edilen veriler kontrol ve lif katkılı karışımlar arasında karşılaştırılarak lif türünün pomza agregalı hafif harçların mekanik performansı üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir.



Görsel 3. Numunelerin kalıplanması, su küründe bekletilmesi ve deney aşaması

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

3.1 Eğilme Dayanımı

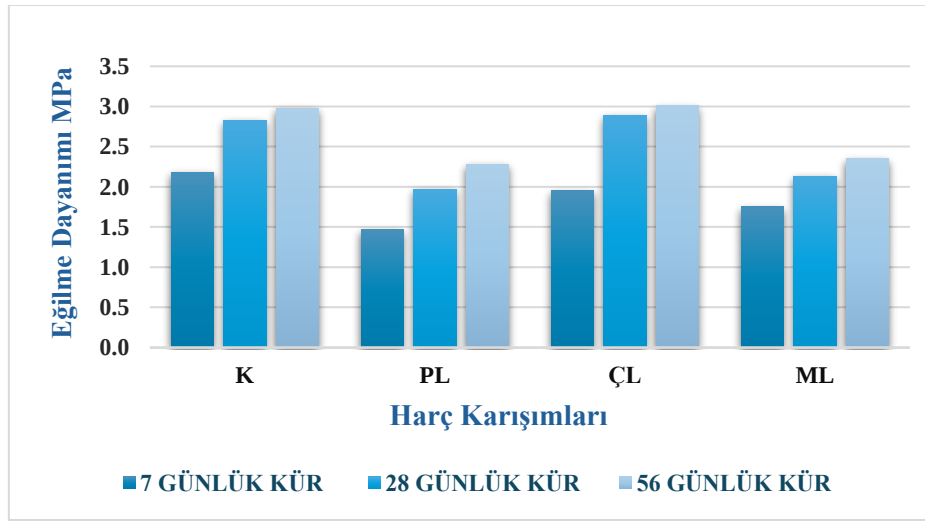
Numunelerin 7, 28 ve 56 günlük su kürü sonrasında belirlenen eğilme dayanımı sonuçları Görsel 4 ’te verilmiştir. Tüm karışımlarda kür süresinin artmasıyla birlikte eğilme dayanımı değerlerinde değişim meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum, çimento hidratasyonunun zamanla devam etmesi ve matris yapısının daha kompakt hale gelmesi ile ilişkilendirilebilir [15].

7 günlük kür sonunda K, PL, ÇL ve ML numunelerde sırasıyla 2,2 MPa, 1,5 MPa, 1,9 MPa ve 1,8 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir. 28 günlük kür sonunda bu değerler sırasıyla 2,8 MPa,

1,9 MPa, 2,9 MPa ve 2,1 MPa'a yükselmiştir. En yüksek eğilme dayanımları ise 56 günlük kür sonunda elde edilmiş olup kontrol, PL, ÇL ve ML numuneleri için sırasıyla 3,0 MPa, 2,3 MPa, 3,0 MPa ve 2,3 MPa olarak belirlenmiştir.

56 günlük sonuçlar incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımının 3,0 MPa ile %0,5 çelik lif içeren ÇL numunesinde elde edildiği görülmektedir. Çelik liflerin matris içerisinde çatlak köprüleme etkisi oluşturarak çatlak ilerlemesini geciktirdiği ve yük aktarım kapasitesini artırdığı düşünülmektedir [7,13].

PL numunesinde ise tüm kür yaşlarında kontrol numunesine kıyasla daha düşük eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. 56 günlük kür sonunda PL numunesinin eğilme dayanımı kontrol numunesine göre yaklaşık %23 oranında azalmıştır. Benzer şekilde ML numunesinde de kontrol numunesine göre yaklaşık %21 oranında dayanım kaybı meydana gelmiştir. Bu durumun liflerin matris içerisinde homojen dağılmaması, lif-matris aderansının yetersiz kalması ve karışım içerisinde ilave boşluk oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir [12]. Ayrıca lif oranlarının eğilme dayanımına etkisi olduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçlar literatürde de rapor edilmiş olup lif kullanımının tek başına eğilme dayanımında artış sağlamadığı lif türü ve kullanım oranının sonuçlar üzerinde belirleyici olduğu belirtilmiştir.



Görsel 4. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

3.2 Basınç Dayanımı

Numunelerin 7, 28 ve 56 günlük su kürü sonrasında belirlenen basınç dayanımı sonuçları Görsel 5'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm karışımlarda kür süresinin artmasıyla birlikte basınç dayanımının arttığı görülmektedir.

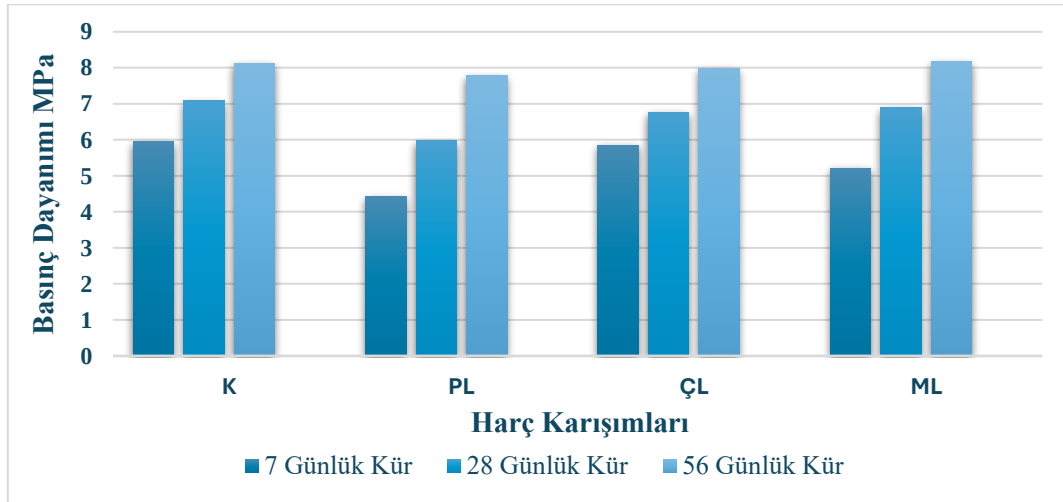
7 günlük kür sonunda K, PL, ÇL ve ML numunelerde sırasıyla 6,0 MPa, 4,4 MPa, 5,8 MPa ve 5,2 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. 28 günlük kür sonunda bu değerler sırasıyla 7,1 MPa, 6,0 MPa, 6,7 MPa ve 6,9 MPa'a yükselmiştir. 56 günlük kür sonunda ise en yüksek dayanım değerleri elde edilmiş olup K, PL, ÇL ve ML numuneleri için sırasıyla 8,1 MPa, 7,9 MPa, 8,0 MPa ve 8,2 MPa olarak belirlenmiştir.

56 günlük sonuçlar incelendiğinde en yüksek basınç dayanımının 8,2 MPa ile %0,5 macromesh lif içeren ML numunesinde elde edildiği görülmektedir. Makromesh liflerin harç matrisi içerisinde oluşan çatlakların yayılımını sınırlandırdığı ve yüklerin daha homojen dağılımına katkı sağladığı bilinmektedir [9]. Bununla birlikte tüm lifli karışımların kontrol numunesine yakın ve bazı durumlarda daha yüksek dayanım göstermesi, lif katkısının basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etki oluşturmadığını göstermektedir.

PL numunesinde 7 günlük kürde kontrol numunesine göre daha düşük dayanım elde edilmesine rağmen, 56 günlük kür sonunda önemli bir artış göstererek 7,8 MPa değerine ulaşmıştır. Bu artış, zamanla lif-matris aderansının gelişmesi ve hidrasyonun devam etmesi ile ilişkilendirilebilir.

ÇL numunesinde ise 56 günlük basınç dayanımı 7,9 MPa olarak ölçülmüştür. Çelik liflerin eğilme davranışı ve çatlak kontrolü üzerinde olumlu etkileri bilinmesine rağmen, basınç dayanımına katkıları sınırlı olduğu literatürde belirtilmektedir [16].

Genel olarak değerlendirildiğinde kür süresinin artması tüm karışımların basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. 7 günlük sonuçlarla karşılaştırıldığında 56 günlük kür sonunda basınç dayanımı artışları K, PL, ÇL ve ML numuneleri için sırasıyla %36, %76, %36 ve %56 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak basınç dayanımı açısından en yüksek değerin %0,5 ML numunesinde elde edildiği belirlense de bu artış sınırlı kalmıştır.



Görsel 5. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

- Deneyisel bulgular, pomza agregası kullanılarak üretilen hafif harçlarda kür süresinin uzamasıyla birlikte mekanik özelliklerde belirgin bir iyileşme olduğunu ortaya koymuştur. Bu gelişim, çimento hidrasyonunun ilerlemesi sonucunda matrisin zamanla daha sıkı ve dayanımlı bir yapıya dönüşmesiyle ilişkilidir.
- Eğilme davranışı açısından lif ilavesinin etkisinin kullanılan lif tipine göre değiştiği belirlenmiştir. Çelik lif içeren karışım referans numuneye kıyasla sınırlı bir artış gösterirken, polipropilen ve makromesh lif katkılı karışımlarında eğilme dayanımı sınırlı kalmıştır. Bu durum liflerin karışım içerisinde dağılım farklılıkları, aderans özellikleri ve boşluk miktarıyla açıklanabilir.

- Basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, lif katkısının genel olarak performansı olumsuz etkilemediği, aksine bazı karışımlarda referans numuneye yakın veya bir miktar yüksek değerler elde edildiği görülmüştür.
- Çelik liflerin eğilme davranışına katkısının daha belirgin olduğu, ancak basınç dayanımı üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.
- Genel olarak değerlendirildiğinde, lif katkısının hafif pomza harçlarında doğrudan yüksek dayanım artışı sağlamaktan çok, çatlak kontrolü ve davranış iyileştirme açısından etkili olduğu; lif etkisini daha net ortaya koymak için çimento ve lif dozajlarını farklı oranlarda denenmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Alkhalafalallian, R., Ekmen, Ş. Optimisation of synergistic utilization of glass and pumice powder in fiber-reinforced mortars: balancing rheology, strength and durability, *Construction and Building Materials*, July, 483, 141598, 2025.
- [2] Arvizu-Montes, A., Guerrero-Bustamante, O., Polo-Mendoza, R., Martinez-Echevarria, M. J. Mechanical performance of fiber-reinforced cement mortars: A comparative study on the effect of synthetic and natural fibers, *Buildings*, July, 15, 13, 2025.
- [3] Aslani, F., Samali, B. Investigating the mechanical and microstructure properties of fibre reinforced lightweight concrete, *Case Studies in Construction Materials*, December, 13, e00416, 2020.
- [4] Coşkun, A., Sarıışık, A. Polipropilen Lif Takviyeli Pomza Tozu İçeren Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Mart, 11, 1, 2022.
- [5] Hossain, K. M. A. The effect of polypropylene, steel, and macro synthetic fibers on the mechanical properties of lightweight concrete, *Revista de la Construcción*, December, 20, 3, 2021.
- [6] Khan, M., Ali, M. The mechanical properties of lightweight (volcanic pumice) concrete containing fibers with exposure to high temperatures, *Journal of Measurements in Engineering*, December, 10, 4, 2022.
- [7] Li, J., Zhang, Y. Significance of fiber characteristics on the mechanical properties of lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, June, 385, 131302, 2023.
- [8] Kockal, N. U., Camurlu, H. E. Lightweight Pumice Mortars with Polypropylene Fiber Reinforcement, *Arabian Journal for Science and Engineering*, October, 45, 10, 2020.
- [9] Sarıdemir, M. Lightweight pumice mortars with polypropylene fiber reinforcement, *ResearchGate Publication*, May, 2, 2, 2020.
- [10] Shubaili, M. Effect of volcanic pumice powder on the properties of fiber-reinforced cement mortars, *Reviews on Advanced Materials Science*, July, 64, 1, 2025.
- [11] Singh, B., Kumar, R. Impact of macro-polypropylene fiber on the mechanical properties of ultra-high performance concrete, *Materials Today: Proceedings*, April, 82, 1207, 2023.
- [12] Tanyıldızı, M., Gökarp, İ. Utilization of pumice as aggregate in the concrete: A state of art, *Construction and Building Materials*, May, 377, 131102, 2023.
- [13] Wang, X., Liu, Z. Development and microstructural characterization of ultra-lightweight concrete with self-leveling properties, *Discover Applied Sciences*, December, 6, 12, 2024.

- [14] Yılmaz, B., Koç, A. Cam tozu katkılı lifli harçların fiziksel ve mekanik özellikleri, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Aralık, 3, 2, 2020.
- [15] Zhu, Y. Mechanical and thermal insulation properties of rGFRP fiber reinforced lightweight geopolymer mortar, *Sustainability*, April, 15, 9, 2023.
- [16] Meng, S., Li, J., Liu, Z., Wang, W., Niu, Y., Ouyang, X. Study of flexural and crack propagation behavior of layered fiber reinforced cementitious mortar using the digital image correlation (DIC) technique, *Materials*, August, 14, 16, 2021.

POMZA AGREGALI HAFİF HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİNE MİKRONİZE BAZALT VE DERE KUMU DOLGU MALZEMELERİNİN ETKİSİ

İnş. Müh. Esin Eylül ÇELİK

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi,

esineylulcelik@gmail.com

ORCID ID:0009-0005-8864-0786

Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi,

ismailatabey@nevsehir.edu.tr

ORCID ID:0000-0002-7026-5579

Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi,

scelikten@nevsehir.edu.tr

ORCID ID:0000-0001-8154-7590

ÖZET

Bu araştırmada, mikronize bazalt kumu ve dere kumunun farklı boyutlarda ilave edilmesinin, pomza agregalı hafif harçların taze ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, mikronize dolgu malzemesi içermeyen bir kontrol grubunun yanı sıra, 4 farklı mikronize dolgu kombinasyonuna sahip toplam 5 harç karışımı hazırlanmıştır. Harç karışımlarında pomza agregası, çimento miktarı ve su oranı sabit tutularak yalnızca mikronize dolgu malzemelerinin performansı test edilmiştir. Üretilen harç numuneleri kalıptan çıkarıldıktan sonra, $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki su havuzunda 7 ve 28 gün boyunca kür edilmiştir. Bu süreç sonunda harçların; birim hacim ağırlık (BHA), eğilme ve basınç dayanımı özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, her bir karışıma ait 3 farklı numuneden elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Deneysel bulgular; 10 MPa ile 18 MPa arasında değişen dayanım değerleriyle, hem orta dayanımlı hem de taşıyıcı hafif beton sınıfında hafif harç karışımlarının üretilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, mikronize bazalt kumu ikamesinin harçların basınç dayanımını %28'e varan oranda artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Pomza Agregası, Hafif Harç, Bazalt Kumu, Dere Kumu,

1.GİRİŞ

Genel olarak harç, ince agrega ve çimento gibi bağlayıcı maddeler ile belirli oranlarda suyun karışımı sonucunda oluşan bir yapı malzemesidir. Harç içeriğindeki hafif agrega özellikleri, karışım suyu miktarı ve kür koşulları harç özelliklerini etkilerken, bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanımı, dayanım artışına katkı sağlamaktadır [1]. Hafif agregaların normal agrega ile belirli oranlarda yer değiştirilerek kullanılmasıyla hafif harçlar elde edilebilmektedir. Doğal hafif agrega kaynağı olan pomza agregası ve volkanik tüf kullanılarak hafif harçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca hafif harçlar, yapının ölü yükünü azaltırken ısı ve ses yalıtımını iyileştirmektedir. Bu nedenle, inşaat sektöründe kullanımı yaygınlaşan bir ürün haline gelmiştir [2].

Pomza agregası, volkanizma etkisinde oluşmuş, farklı şekil ve boyutlarda, hafif, boşluklu ve camsı bir yapıya sahip kayadır. Yapısındaki boşluklar genellikle birbiri ile bağlantılı değildir [3]. Pomza agregası, yapısındaki boşluklar sayesinde ses ve ısı yalıtımı sağlarken aynı zamanda hafiftir. Bu nedenle inşaat sektöründe önemli bir hafif yapı malzemesi olarak bilinir [4]. İltis (2010), çalışmada pomza agregasını kullanarak hafif harç ve sıva karışımları geliştirmiş, elde ettiği harçların fiziksel, mekanik ve ısı özelliklerini değerlendirmiştir. Sonuçlara bakıldığında, pomza esaslı harçların geleneksel harçlara göre daha düşük birim hacim ağırlığa sahip olduğunu ve daha iyi ısı yalıtımı sağladığını göstermiştir [5].

İnşaat harçlarında kullanılan dolgu malzemeleri; kum, çakıl ve mineral tozlar gibi ince agregalardan oluşur. Bu malzemeler büzülmeyi azaltır, yapının dayanıklılığını geliştirir ve çimento gibi bağlayıcı bileşenlerin daha iyi tutunmasına katkı sağlayarak harcın performansını artırır. Ayrıca bağlayıcı malzemeler belirli bir süre sonunda sertleşerek dayanım kazandığından agregaları bir arada tutmak amacıyla kullanılabilir [6-7].

Dolgu malzemesi olarak da kullanılan mikronize dere kumu, nehir ve dere yataklarındaki akıntıların aşındırarak sürüklediği kayaların parçalanmasıyla oluşan, içeriğinde çoğunlukla kuvars bulunan ve doğal bir dere kumunun elenmesi ile elde edilen agregadır. Kullanılan harcın niteliği bakımından dere kumu en uygun agregalardan biridir. Çünkü akıntıların aşındırarak sürüklediği kayaların parçalanmasıyla elde edilen dere kumu dağılmaz ve mukavemeti yüksektir [7].

Bazalt taşlarının kırılması ve elenmesiyle elde edilen bazalt kumu, mikron mertebesinde çok ince boyutlarda öğütülerek mikronize bazalt tozu haline getirilir. Mikronize bazalt tozu yapı malzemelerinde, endüstriyel bir dolgu katkısı olarak kullanılabilir. Özel harçlarda bağlayıcılığı artırır, kimyasal saflığı ve dayanıklılığının yüksek olması sebebiyle beton ve sıvalarda çatlakları önler. Ayrıca agrega ile bazaltın yer değişiminin eğilme ve basınç dayanımında artış sağladığı, betonun kalitesine olumsuz etki yapmadığı ve ince malzeme olarak kullanılabileceği rapor edilmiştir [8].

Akyüncü ve Cihan (2019), agrega üretimi sırasında oluşan bazalt tozu vb. tozlar, çevre ve insan sağlığı açısından soruna yol açtığından sürdürülebilir üretim ve atıkların yeniden değerlendirilmesinin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle ortaya çıkan bazalt tozunu farklı oranlarda çimento ile yer değiştirerek harç numuneleri üretmişlerdir. Basınç ve eğilme

dayanımı sonuçlarına göre bazalt tozunun çimento ile yer değiştirilerek kullanılması dayanım artışına katkı sağlamıştır. Ayrıca bazalt tozunun ince dolgu etkisi ve puzolanik özelliği sayesinde çimento hamurundaki boşluk yapısını iyileştirip C-S-H üretimini arttırarak, harçların performansını arttırdığını belirtmişlerdir [8]. Atabey ve arkadaşları (2023), binalarda kullanılan geleneksel şap harçlarının yalıtım ve ısı performansını iyileştirmek amacıyla geri dönüştürülmüş EPS (genleştirilmiş polistiren) kullanmışlardır. EPS'yi, dere kumu yerine farklı oranlarda ikame ederek hafif harçlar üretmişlerdir. EPS kullanımının birim ağırlığı ve ısı iletkenliği düşürerek şap harcının hafif ve yalıtım performansını artırdığını göstermişlerdir [9]. Gündüz ve Kalkan (2023), hafif ve kendiliğinden yerleşebilen çimento esaslı tesviye şaplarını geliştirmek amacıyla, farklı boyutlardaki pomza agregalarını kullanarak 10 farklı karışım hazırlamışlardır. Sonuç olarak, uygun oranlarda pomza agregası kullanımıyla düşük yoğunluklu, kendiliğinden yayılabilen tesviye şapı harçlarının üretilebileceğini göstermişlerdir [10]. Akpınar ve Koçyiğit (2026), doğal kökenli pomza agregası ile doğal kökenli bir zambak olan tragakant bağlayıcısının hafif yapı malzemesi olarak üretimini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda; pomza ve tragakant miktarının artırılmasının ısı yalıtım özelliklerini geliştirirken, malzemenin mekanik dayanımını azalttığından taşıyıcı yapı elemanlarında kullanım için uygun olmadığını vurgulamışlardır [11]. Değirmenci ve Yılmaz (2011), hafif çimento harcı üretiminde ince agrega yerine pomza kullanımının uygunluğu araştırmışlardır. Elde edilen bulgularda, pomza agregalı harçların hafif yapı malzemeleri için gerekli dayanım ve birim hacim ağırlık kriterlerini karşıladığını göstermiş ve standart kum kullanılan harçlara göre önemli ölçüde daha düşük birim hacim ağırlığa sahip olduklarını vurgulamışlardır [12]. Widodo ve arkadaşları (2017), pomzanın ince agrega olarak harç üretiminde kullanılmasının ısı iletkenlik ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, ince agrega olarak pomza kullanımının harçların ısı iletkenliğini önemli ölçüde azalttığını ve böylece yapıların ısı yalıtım performansını artırabileceğini gösterirken basınç dayanımındaki düşüş sebebiyle yapısal olmayan elemanlarda kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır [13]. Rashad (2019), çalışmada pomzanın beton ve harçların taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Pomzanın, alkali-silika reaksiyonu (ASR) kaynaklı genleşmeleri azaltarak malzemenin uzun dönem performansına olumlu katkıda bulunduğunu ve ayrıca pomzanın sürdürülebilir, hafif ve enerji verimli yapı malzemelerinin üretiminde önemli bir alternatif olduğunu vurgulamıştır [14]. Etli ve arkadaşları (2021), pomza ve yapay hafif ince agrega kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların hem taze hem de sertleşmiş özelliklerini olumlu yönde geliştirdiğini göstermişlerdir. Pomza ilavesinin yapay hafif agreganın neden olabileceği olumsuz etkilerini azaltarak harç özelliklerine pozitif katkı sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu nedenle pomzanın, hafif ve sürdürülebilir harç üretiminde performansı artırıcı bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [15]. Hossain ve arkadaşları (2016), pomza betonunun geliştirilmesi ve performansının değerlendirilmesini amaçlamışlardır. Çalışma, ekonomik ve çevre dostu özellikler taşıyan pomzalı hafif betonların sürdürülebilir yapı uygulamalarında ve volkanik afetlerden etkilenen bölgelerin yeniden inşasında önemli bir alternatif malzeme olabileceğini vurgulamışlardır [16]. Karataş ve arkadaşları (2017), normal agregaların yanı sıra genleşmiş perlit ve pomza gibi hafif agregalar kullanarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların yüksek sıcaklık direnci üzerinde agrega türünün etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, hafif agrega kullanım

oranındaki artışın harçların toplam su emme değerlerini ve porozitelerini artırdığını saptamışlardır [17].

Literatürde mikronize dolgu malzemelerinin hafif harçlardaki etkisine dair çalışmaların kısıtlı olmasından hareketle planlanan bu deneysel çalışmada; pomza agregalı hafif harç karışımlarına farklı boyutlarda mikronize bazalt ve dere kumu eklenerek, bu malzemelerin harcın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Amaç

Bu çalışmanın temel amacı; pomza agregasının boşluklu yapısından kaynaklanan dayanım kayıplarını telafi etmek amacıyla bazalt ve dere kumu dolgularını kullanmak ve bu malzemelerin hafif harçların mekanik performansına olan etkilerini incelemektir. Bu amaçla 40×40×160 mm'lik kalıplar için; bağlayıcı olarak çimento kullanılmış ve hafif harçlar üretilmiştir. Literatüre bakıldığında mikronize dolgu malzemeleri ile yapılan harçlarda dayanımın iyileştiği görülmüştür [8]. Bu nedenle pomza agregalı hafif harç karışımlarında, farklı mikron boyutlarında bazalt ile dere kumu eklenerek harçlar oluşturulmuş ve dayanım özellikleri karşılaştırılmıştır. Tüm harç gruplarına birim hacim ağırlık, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2.2. Materyal Metot

Çalışmada kullanılan Pomza Agregası Görsel 1'de görüldüğü üzere, Nevşehir bölgesinde faaliyet gösteren bir firmadan, Dere Kumu Kayseri bölgesinde faaliyet gösteren bir firmadan ve Bazalt kumu yurt içinde bulunan bir tedarikçiden temin edilmiştir. Görsel 2'de verilen, hafif harç üretiminde TS EN 197-1 standartlarına uygun CEM IV Puzolanik çimento 32,5 N kullanılmıştır.



Görsel 1. Pomza Agregası



Görsel 2. CEM IV Puzolanik Çimento

Çalışmada üretilen hafif harç karışımında öncül malzemeler pomza agregası, bazalt kumu, dere kumu, çimento ve sudur. Karışımların su/çimento oranı 0,50 olarak seçilmiştir. Kontrol grubu pomza agregası, su ve çimentodan oluşmaktadır. Pomza agregalı kontrol grubuna, 125 mikron elekten geçen ve 63 mikron elek üstünde kalan dere kumu ve bazalt kumu ayrı ayrı ilave edilmiştir. Bu grupta üretilen karışımlar 63K1 ve 63B1 olarak kodlanmıştır. Diğer grupta 250 mikron elekten geçen ve 125 mikron elek üstünde kalan dere kumu ile bazalt kumu, 125K2 ve 125B2 olarak kodlanmıştır. Kontrol ve iki grup dere kumu, iki grup bazalt kumu ile toplam 5 farklı karışım grubu elde edilmiştir. Karışımlar Hobart tipi mikserde, homojen olacak şekilde karıştırılarak taze harç numuneleri üretilmiştir. Sonrasında üç gözlü 40×40×160 mm yağlanmış

kalıba iki aşamada dökülmüştür. Her aşamanın sonunda kalıba yerleştirilen karışımlar vibrasyon işlemine tabii tutulmuştur. Kalıplardan çıkan numuneler tartılarak ağırlıkları not edilmiş ve $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suda 7 ve 28 gün ayrı ayrı kür edilmiştir. Kür edilen numunelerin ağırlıkları tekrar tartılarak birim hacim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Her bir karışım deney sonucu için 3 farklı numuneden elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

Çizelge 1. Hafif Harçların Karışım Oranları

Karışım	S/Ç	Su (g)	Çimento (g)	Dere Kumu	Bazalt Kumu	Pomza (0,63 mm – 8 mm)	Kıvam Suyu (g)
				(g)	(g)	(g)	
KONTROL	0,5	150	300	0	0	450	130
63K1	0,5	150	300	150	0	450	130
63B1	0,5	150	300	0	150	450	130
125K2	0,5	150	300	150	0	450	130
125B2	0,5	150	300	0	150	450	130

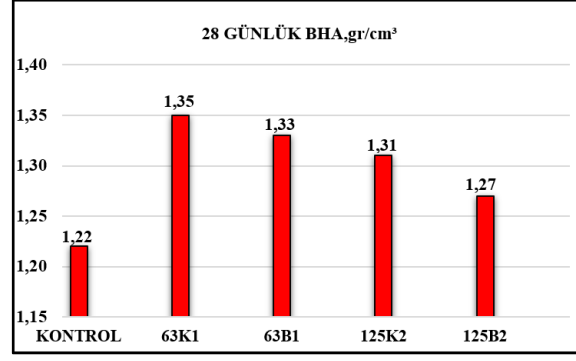


Görsel 3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

3.1. Birim Hacim Ağırlık (BHA)

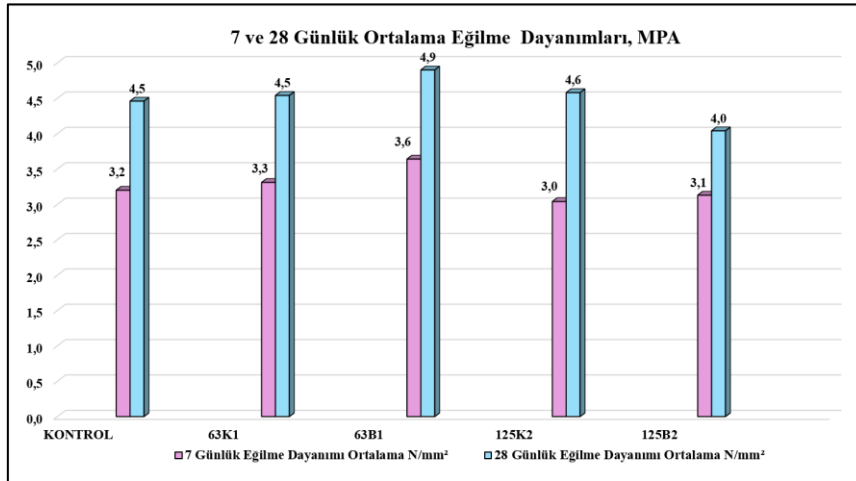
Birim hacim ağırlık (BHA) değerleri Görsel 4’te sunulmuştur. 28 günlük BHA değerleri, tüm karışımlar için $1,22 - 1,35 \text{ g/cm}^3$ aralığında değişmiştir. En düşük BHA değeri 28 günlük kontrol grubu harçlarda $1,22 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. 28 günlük pomza agregalı hafif harçların, BHA değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Elde edilen BHA değerlerine bakıldığında orta dayanımlı (Görsel 7) beton sınıfında pomza agregalı hafif harçlar üretilmiştir [20]. Ayrıca; Akyüncü (2019), çalışmasında pomza agregası ile ürettiği hafif beton blokların birim hacim ağırlık değerlerinin $900 - 1400 \text{ kg/m}^3$ arasında değiştiğini ve normal beton blokların birim hacim ağırlığının 2180 kg/m^3 olduğunu ifade etmiştir. Ürettiği pomza agregalı hafif beton blokların, orta dayanımlı ve taşıyıcı hafif beton sınıfında yer aldığı görülmektedir [18].



Görsel 4. Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları

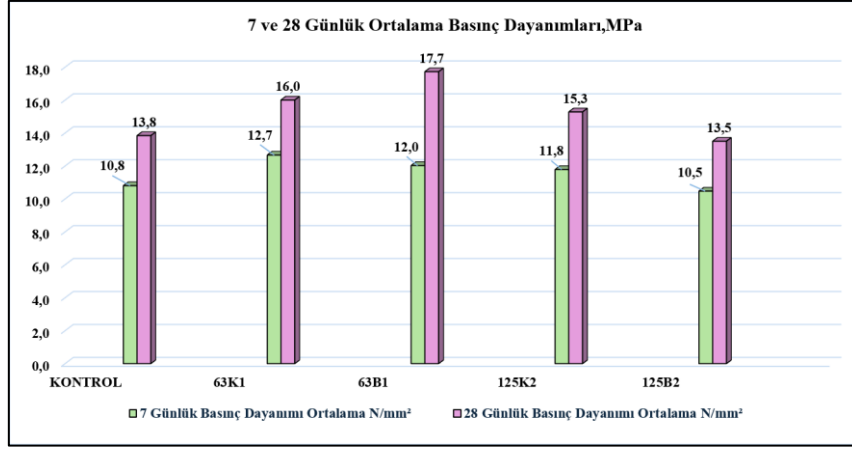
3.2. Eğilme Dayanımı

Sertleşmiş harç numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları Görsel 5’ de görülmektedir. Harçların 7 günlük eğilme dayanımları 3,0 MPa ile 3,6 MPa arasında değişirken, 28 günlük eğilme dayanımları 4,0 MPa ile 4,9 MPa arasında değişmektedir. 7 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde; 63B1 grubunun kontrol grubuna kıyasla daha yüksek bir performans gösterdiği, 125K2 ve 125B2 gruplarında ise kontrol grubuna yakın değerler elde edildiği görülmüştür. 28 günlük eğilme dayanımlarında ise kontrol grubuna kıyasla 63K1 grubu benzer bir değer sergilerken, 63B1 grubunda artış kaydedilmiştir. Buna karşın, 125K2 grubu kontrol grubu ile yakın değerlerde kalmış, 125B2 grubunda ise azalma gözlenmiştir. Bu durum 28 günlük harç numunelerinde 63 mikron elek üstü bazalt kumunun, dere kumuna göre daha olumlu etki sağladığını göstermiştir. Eğilme dayanımı 7 günden 28 güne kür süreleri sonunda artış göstermiştir. Gündüz ve Kalkan (2023) ’da çalışmalarında, ince pomza agregalı kendiliğinden yerleşen hafif harç üretiminde kür süresinin zamana bağlı artışı ile dayanımların arttığını ifade etmişlerdir [19].



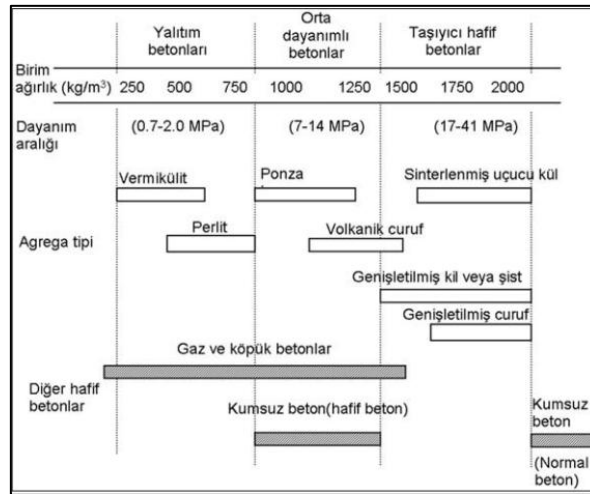
Görsel 5. Eğilme Dayanımı Deneyleri Sonuçları

3.3.Basınç Dayanımı



Görsel 6. Basınç Dayanımı Deneyleri Sonuçları

Pomza agregalı hafif harçların basınç dayanımları Görsel 6’da verilmiştir. Harç karışımlarının 7 günlük basınç dayanımı değerleri 10,5 MPa ile 12,7 MPa arasında değişmektedir. 7 günlük basınç dayanım değerleri kontrol grubuna göre, 125B2 grubu harçlar haricinde artış göstermiştir. 7 günlük en yüksek basınç dayanımı 63K1 grubu harç karışımlarında elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı değerleri ise 13,5 MPa ile 17,7 MPa arasında değişmektedir. 28 günlük en yüksek basınç dayanımı, 63B1 karışımında 17,7 MPa olarak elde edilmiştir. 7 günlük harçlarda olduğu gibi, 28 günlük harç karışımlarında da basınç dayanımı değerleri kontrol grubuna göre, 125B2 grubu harçlar haricinde artış göstermiştir. Kontrol grubu harç karışımlarına farklı boyutlardaki mikronize bazalt ve dere kumunun ilavesi genel olarak harcın içerisindeki boşlukları doldurarak dayanımı iyileştirmiştir. Benzer olarak Akyüncü ve Cihan (2019) çalışmalarında, bazalt kumunun ince dolgu etkisinin çimento hamurundaki boşluk yapısını iyileştirdiğini, C-S-H üretimini arttırarak harç performansını arttırdığını ifade etmişlerdir [8].



Görsel 7. Hafif Betonların Sınıflandırılması [20]

Görsel 7’de görüldüğü üzere 7-14 MPa arasında orta dayanımlı beton ve 17-41 MPa arasında ise taşıyıcı hafif betonlar sınıflandırılmıştır [20]. Elde edilen sonuçlarda, mikronize bazalt ve

dere kumu dolgu malzemeleri ile üretilen pomza agregalı hafif harç karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı değerlerine bakıldığında hem orta dayanımlı hem de taşıyıcı hafif beton sınıfında hafif harçlar üretilmiştir.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

- Pomza agregası ile 1,22-1,35 g/cm³ aralığında BHA değerlerine sahip hafif harçlar üretilmiştir.
- 28 günlük eğilme dayanımı değerlerinde, pomza agregası ile 63 mikron elek üstü bazalt kumunun, dere kumuna göre, daha olumlu sonuç verdiği görülmüştür.
- Mikronize bazalt kumu ve dere kumu ilavesi ile basınç dayanımlarında artış sağlanmıştır.
- Bazalt kumu ve dere kumu ilave edildiğinde de birim ağırlığı 2,00 g/cm³'den düşük hafif harçlar elde edilmiştir.
- Basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık değerleri sonuçlarına bakılarak, orta dayanımlı ve taşıyıcı hafif beton sınıfında hafif harçlar elde edilmiştir.
- Bazalt ve dere kumu esaslı mikronize dolgu malzemelerini kullanarak dayanım gelişimine katkı sağlanmış ve hafif harç birim ağırlık değerlerinde, orta dayanımlı hafif harçlar elde edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Kocaman, B., Tunç, T., Okuroğlu, M., Örüng, İ. Doğal Hafif Agregaların Tarımsal Yapılarda Duvar ve Sıva Harcı Yapımında Kullanılma Olanakları. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 36(2), 187–191, 2011.
- [2] Eren, H., İlkentapar, S., Durak, U. EPS ve Atık Poliüretan ile Üretilmiş Hafif Harçların Mekanik Özelliklerinin, Isı Geçirimsizlik Özelliklerinin ve Yüksek Sıcaklığa Karşı Dirençlerinin Karşılaştırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 360–370, 2022.
- [3] Elmastaş, N. Türkiye Ekonomisi İçin Önemi Giderek Artan Bir Maden: Pomza (Sünger Taşı). Journal of International Social Research, 5(23), 197–206, 2012.
- [4] Orhan, A., Dinçer, İ., Akın, M., Çoban, S. Nevşehir Pomza Endüstrisi'nin Genel Değerlendirilmesi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(2), 571–579, 2017.
- [5] İlder, O. *Use Of Pumice In Mortar And Rendering For Lightweight Building Blocks*, Master of Science, Eastern Mediterranean University, Institute of Graduate Studies and Research, 2010.
- [6] Moosberg-Bustnes, H., Lagerblad, B., Forssberg, E. The Function of Fillers in Concrete. Materials and Structures, 37(2), 74–81, 2004.
- [7] Erdoğan, N.. *Çimento Harçlarının Niteliklerinin İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2005)
- [8] Akyüncü, V., Cihan, M. T. Bazalt Tozu Katkılı Harçların Mekanik ve Geçirimsizlik Özelliklerinin Araştırılması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2), 881–893, 2019.
- [9] Atabey, İ. İ., Almaz, Z., İlkentapar, S., Durak, U., Karahan, O., Atış, C. Geri Dönüştürülmüş Atık EPS'nin Yüksek Dayanımlı Hafif Şap Üretiminde Kullanımının Araştırılması. Düzce University Journal of Science and Technology, 11(1), 288–301, 2023.

- [10] Gündüz, L., Kalkan, Ş. O. İnce Pomza Agreganın Çimento Esaslı Kendiliğinden Yayılan Tesviye Şapının Performansına Etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(1), 225–238, 2023.
- [11] Akpınar, E. K., Koçyigit, F. Thermal and Mechanical Properties of Lightweight Concretes Produced with Pumice and Tragacanth. Journal of Adhesion Science and Technology, 30(5), 534–553, 2016.
- [12] Degirmenci, N., Yilmaz, A. Use of Pumice Fine Aggregate as an Alternative to Standard Sand in Production of Lightweight Cement Mortar. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 18(1), 61–68, 2011.
- [13] Widodo, S., Ma'arif, F., Gan, B. S. Thermal Conductivity and Compressive Strength of Lightweight Mortar Utilizing Pumice Breccia as Fine Aggregate. Procedia Engineering, 171, 768–773, 2017.
- [14] Rashad, A. M. A Short Manual on Natural Pumice as a Lightweight Aggregate. Journal of Building Engineering, 25, 100802, 2019.
- [15] Etli, S., Cemalgi, S., Onat, O. Effect of Pumice Powder and Artificial Lightweight Fine Aggregate on Self-Compacting Mortar. Computers and Concrete, 27(3), 241–252, 2021.
- [16] Hossain, K. M. A., Ahmed, S., Lachemi, M. Lightweight Concrete Incorporating Pumice Based Blended Cement and Aggregate: Mechanical and Durability Characteristics. Construction and Building Materials, 25(3), 1186–1195, 2011.
- [17] Karataş, M., Balun, B., Benli, A. High Temperature Resistance of Self-Compacting Lightweight Mortar Incorporating Expanded Perlite and Pumice. Computers and Concrete, An International Journal, 19(2), 121–126, 2017.
- [18] Akyüncü, V. Pomza Agregalı Hafif Beton Blokların Mekanik Özelliklerinin ve Yangın Etkisi Altındaki Davranışının İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 147–157, 2019.
- [19] Gündüz, L., Kalkan, Ş. O. İnce Pomza Agreganın Çimento Esaslı Kendiliğinden Yayılan Tesviye Şapının Performansına Etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(1), 225–238, 2023.
- [20] Taşdemir, C. Hafif Betonların Isı Yalıtım ve Taşıyıcılık Özellikleri. Türkiye Mühendislik Haberleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 427, 57–61, 2003.

NaOH İLE ALKALİ YIKAMA ÖN MUAMELESİNİN MALKARA VE SİBİRYA KÖMÜRLERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞINA ETKİSİ

İsmail Ekrem KÜTÜKCÜLER

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, ekrem171992@gmail.com - 0009-0006-9837-4757

Prof. Dr. Mustafa ÇINAR

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, mcinar@comu.edu.tr - 0000-0001-9553-423X

ÖZET

Düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerin flotasyonla zenginleştirilmesinde başlıca sınırlayıcı etkenlerden biri, kömür yüzeyinde bulunan hümkik maddeler ve oksijenli fonksiyonel gruplar nedeniyle gelişen hidrofilik karakterdir. Bu çalışmada, farklı kömürleşme derecelerini temsil eden iki kömür (düşük kömürleşme derecesine sahip Malkara linyiti ve doğal flotasyon verimi yüksek Sibiry kömürü) üzerinde sodyum hidroksit (NaOH) ile alkali yıkama ön muamelesinin, gaz yağı kollektörü kullanılarak yürütülen flotasyon deneylerine etkisi incelenmiştir. Numuneler farklı NaOH molaritelerinde muamele edilmiş ve yıkama sonrasında 500, 1000, 2000, 3000 ve 4000 g/t gaz yağı dozajlarında flotasyon deneylerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, alkali yıkama yanıtının kömürün başlangıç yüzey özelliklerine güçlü biçimde bağlı olduğunu ve iki kömürde zıt yönde geliştiğini göstermektedir. Malkara kömüründe 0,8 M NaOH koşulunda 4000 g/t dozajdaki kümülatif yüzen ürün verimi %13,13'ten %35,94'e yükselirken, doğal hidrofobikliği yüksek Sibiry kömüründe aynı işlem verimi %100 düzeyinden %56,74'e düşürmüştür. Tüvenan numunelerin FTIR temelli bağlı hidrofiliklik indeksi ve su damlası temas açısı ölçümleri bu zıt davranışı desteklemiştir. Malkara'nın tüvenan yüzeyinde su damlası neredeyse tümüyle yayılmış (temas açısı yaklaşık 3°) ve bu kömür en yüksek hidrofiliklik indeksini vermiştir; alkali yıkama sonrasında ise temas açısı yaklaşık 110°'ye ulaşmış ve kömür işleme olumlu yanıt vermiştir. Sibiry kömürü ise tüvenan hâlde yaklaşık 127° temas açısına ve en düşük indekse sahiptir; aynı işlemin ardından açı yaklaşık 110°'ye gerilemiştir. Bulgular, alkali yıkamanın hümkik bileşenlerin kısmen uzaklaştırılması yoluyla uygun düşük kömürleşme dereceli kömürlerde flotasyon yanıtını iyileştirebildiğini; buna karşın doğal hidrofobikliği yüksek kömürlerde yüzey kimyasını olumsuz yönde değiştirebildiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kömür flotasyonu; linyit; alkali yıkama; hümkik asit; NaOH; yüzey hidrofilikliği; kömürleşme derecesi; FTIR; temas açısı

1. GİRİŞ

Kömür flotasyonu, ince boyutlu kömürlerin kül yapıcı mineral maddelerden ayrılmasında yaygın olarak uygulanan bir zenginleştirme yöntemidir. Sürecin etkinliği, kömür yüzeyinin hidrofobikliği, kollektör adsorpsiyonu ve hava kabarcığı ile tane arasındaki bağlanma kuvveti tarafından belirlenmektedir (Somasundaran ve Wang, 2006). Düşük kömürleşme derecesine sahip ve oksitlenmiş kömürlerde bu etkileşimler çoğu zaman sınırlı kalmaktadır; çünkü linyit ve kahverengi kömür yüzeyleri yüksek oranda oksijenli fonksiyonel grup ve hümkik

madde içerebilmektedir. Karboksil, fenolik hidroksil ve karbonil grupları su molekülleriyle güçlü etkileşim kurarak yüzeyin hidrofilik karakterini artırmakta ve gaz yağı gibi apolar kollektörlerin yüzeye adsorpsiyonunu güçleştirmektedir. Xia vd. (2013), düşük kömürleşme dereceli/oksitlenmiş kömürlerde yüzey ön muamelelerinin flotasyon davranışını iyileştirmeye yönelik önemli bir araştırma alanı olduğunu vurgulamıştır. Düşük kömürleşme dereceli kömürlerde yüzey ön muamelesi olarak yalnızca kimyasal yıkama değil, düşük sıcaklıkta ısıtma işlemi de kullanılmıştır. Çınar (2009), bu çalışmada da yer alan Malkara linyitinde 105 °C’de uygulanan ısıtma işleminin oksijenli fonksiyonel grupları azaltarak yüzey hidrofobikliğini ve flotasyon verimini belirgin biçimde artırdığını FTIR analiziyle göstermiştir.

Hümik maddeler, düşük kömürleşme dereceli kömürlerin organik yapısının önemli bileşenlerindendir. Alkali ortamda çözünebilir ve asit ortamda çöken hümik asit fraksiyonu, linyitlerin hem kimyasal değerlendirilmesi hem de yüzey özellikleri açısından belirleyici niteliktedir. BS ISO 5073 (2013) standardında kahverengi kömür ve linyitlerde hümik asit tayini alkali ekstraksiyon esasına dayandırılmıştır. Hümik asidin alkalide çözünmesi, flotasyon öncesi alkali yıkama uygulaması için de kuramsal temel oluşturmaktadır. NaOH, hümik asitleri çözelti fazına alabilmekte; izleyen su yıkaması ise kömür yüzeyindeki hidrofilik hümik bileşenlerin bir bölümünün uzaklaştırılmasına katkı sağlayabilmektedir.

Hümik maddelerin kömür flotasyonu üzerindeki olumsuz etkileri önceki çalışmalarda ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Firth ve Nicol (1981), flotasyon ortamındaki hümik materyalin özellikle kil yüzeyleriyle etkileşerek kollektör tüketimini artırabildiğini ve kömür flotasyonunu baskılayabildiğini bildirmiştir. Laskowski vd. (1986), hümik asidin kömür parçacıkları ve gaz yağı damlacıkları üzerinde daha negatif zeta potansiyeli oluşturduğunu, model yüzeylerde ise temas açısını düşürerek yüzeyi hidrofilikleştirdiğini göstermiştir. Lai vd. (1989), hümik maddelerin yeni açığa çıkan kömür yüzeylerine kolaylıkla adsorplanarak yüzey hidrofobikliğini azalttığını ve buna bağlı olarak flotasyon performansını düşürdüğünü belirtmiştir. Arnold ve Aplan (1986) ise hümik asit varlığının kil şlamı bulunsun veya bulunmasın kömür flotasyonunu baskılayabildiğini rapor etmiştir. Bu çalışmalar hümik madde varlığının flotasyon performansı açısından kritik olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, doğal olarak hümik madde içeren linyitlerde alkali yıkama işlemiyle bu bileşenlerin bir bölümünün giderilmesinin flotasyon davranışına etkisi literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınmış olup, bu konuda kapsamlı değerlendirmeler bulunmamaktadır. Ulusal lisansüstü literatürü de oksitlenmenin flotasyona etkisi (Akgün, 1993), ısıtma ön muameleyle yüzeyliliğin iyileştirilmesi (Seyhan, 1994) ve koşul optimizasyonu (Çevik, 2022) eksenlerinde yoğunlaşmakta olup, hümik madde içeriği ile flotasyon davranışı arasında doğrudan ilişki kuran bir çalışma içermemektedir.

Bu çalışmanın amacı, NaOH ile alkali yıkama ön muamelesinin farklı yüzey özelliklerine sahip iki kömürün flotasyon davranışı üzerindeki etkisini belirlemektir. Malkara linyiti düşük kömürleşme derecesini ve yüksek hümik madde içeriğini, Sibiry kömürü ise doğal flotasyon verimi yüksek ve hidrofobik karakteri güçlü bir kömürü temsil etmektedir. Çalışma üç temel araştırma sorusuna odaklanmaktadır: alkali yıkama düşük doğal flotasyon verimine sahip linyitlerde verimi artırmakta mıdır; optimum NaOH molaritesi kömür tipine bağlı olarak değişmekte midir; doğal hidrofobikliği yüksek kömürlerde bu işlem olumsuz sonuç verebilmekte midir? Bu kapsamda Malkara ve Sibiry numunelerinin gaz yağı dozajına bağlı

flotasyon verimleri karşılaştırılmış ve gözlenen davranışlar hümik madde-yüzey hidrofilikliği ilişkisi çerçevesinde tartışılmıştır.

Bu yönüyle çalışma, literatürde daha yaygın biçimde incelenen flotasyon ortamına dışarıdan hümik madde ilavesi yaklaşımından ayrılmakta; kömür yapısında doğal olarak bulunan hümik bileşenlerin alkali yıkama ile kısmen giderilmesinin flotasyon davranışı üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. Bu yaklaşım, bu kömürlerde kömürleşme derecesi, yüzey kimyası ve flotasyon performansı arasındaki ilişkinin mekanistik açıdan yorumlanmasına katkı sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kömür Numuneleri

Çalışmada Malkara ve Sibiry kömür numuneleri kullanılmıştır. Malkara numunesi Türkiye'deki düşük kömürleşme dereceli kömür sahalarını temsil ederken, Sibiry numunesi doğal flotasyon verimi yüksek ve karşılaştırma amacıyla seçilmiş daha yüksek kömürleşme dereceli bir kömür olarak değerlendirilmiştir. Numuneler çeneli kırıcıda (Mertest LB-100) kademeli olarak kırılmış, bilyalı/çubuklu laboratuvar değirmeninde (Mertest) kuru olarak öğütülmüş ve paslanmaz çelik test elekleriyle elenerek flotasyon deneylerinde kullanılan 36-212 µm tane boyutu aralığına hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler deneylerden önce kuru ve kapalı kaplarda muhafaza edilmiştir.

2.2. Alkali Yıkama Ön Muamelesi

Alkali yıkama deneylerinde kömür numuneleri belirli molaritelerde hazırlanan NaOH çözeltileri ile muamele edilmiştir. Hem Malkara hem Sibiry için 0,1-0,8 M aralığında NaOH koşulları değerlendirilmiştir. Deneyde her deneme için 150 g kömür numunesi hazırlanmış ve 1 L hacimde hazırlanan NaOH çözeltisi içinde muamele edilmiş (katı/sıvı oranı yaklaşık 150 g/L); süspansiyon elektromanyetik karıştırıcıda 700 d/d hızda 1 saat süreyle karıştırılmıştır. Muamele sonrasında katı faz süzölmüş ve çözünmüş hümik maddeler ile alkali kalıntılarının uzaklaştırılması amacıyla su ile tekrarlı biçimde yıkanmıştır. Karıştırma süresi sonunda ve tekrarlı yıkamanın ardından süspansiyon (pulp) pH'ı pH metre ile ölçülmüştür. Yıkanan kömür numuneleri daha sonra flotasyon deneylerinde kullanılmıştır.

2.3. Flotasyon Deneyleri

Flotasyon deneyleri, 1 L hacimli Denver tipi laboratuvar flotasyon makinesinde (Ünal Mühendislik ve Makina Sanayi, İzmir) gerçekleştirilmiştir. Kollektör olarak gaz yağı, köpürtücü olarak ise MIBC kullanılmıştır. Numune hücreye alındıktan sonra 700 d/d karıştırma hızında 3 dakika koşullandırılmış, ardından gaz yağı eklenerek 4 dakika karıştırılmıştır. Köpürtücü olarak 64 µL MIBC ilave edildikten sonra 1 dakika karıştırma yapılmış ve yüzen ürün 1 dakika süreyle toplanmıştır. Aynı deney dizisinde gaz yağı kademeli olarak artırılarak 500, 1000, 2000, 3000 ve 4000 g/t dozajlarına karşılık gelen kümülatif flotasyon verimleri belirlenmiştir. Flotasyon sonunda yüzen ürünler kurutulmuş ve 0,001 g okunabilirlikli hassas terazide (Radwag PS 510.R1) tartılmıştır. Kümülatif yüzen ürün verimi, yüzen ürün kütlesinin başlangıç kömür kütlesine oranı olarak yüzde cinsinden hesaplanmıştır. Çalışmada yalnızca kütle esaslı verim değerlendirilmiş; yüzen ve batan ürünlerin kül içeriği belirlenmediğinden

ayırma seçiciliği incelenmemiştir. Dolayısıyla bildirilen verim değerleri kömürün flotlanabilirliğini yansıtmakta, ürün kalitesi hakkında bilgi vermemektedir.

2.4. Temas Açısı Ölçümü

Kömür numunelerinin yüzey ıslanabilirliği su temas açısı ölçümleriyle değerlendirilmiştir. Numuneler soğuk pres ile tablet haline getirilemediğinden, ölçüm öncesinde birleştirilerek katı bir yüzey oluşturacak biçimde hazırlanmıştır. Ölçümler Dataphysics OCA15EC temas açısı ölçüm cihazında oturan damla (sessile drop) yöntemiyle gerçekleştirilmiş; damla sıvısı olarak 5 µL ultra saf su kullanılmıştır. Temas açıları Young-Laplace denklemine göre hesaplanmış; her koşul için tek bir damla değerlendirilmiş, damlanın sol ve sağ kenarından okunan açılardan ortalaması esas alınmıştır. Tüvenan ve alkali yıkanmış numunelerin temas açıları karşılaştırılarak alkali muamelesinin yüzey ıslanabilirliği üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Birleştirilerek hazırlanan bu yüzeyler preslenmiş peletlere göre daha pürüzlü ve gözenekli olduğundan elde edilen değerler görünen (apparent) temas açısı niteliğindedir; bu nedenle mutlak büyüklükler olarak değil, aynı yöntemle hazırlanmış numuneler arasında göreceli karşılaştırma amacıyla değerlendirilmiştir.

2.5. FTIR Analizi

Kömür numunelerinin yüzey fonksiyonel gruplarındaki değişim Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisiyle incelenmiştir. Tüvenan ve ön muamele görmüş numunelerin spektrumları Thermo Scientific Nicolet iS50 spektrometresinde, ZnSe kristalli ATR (zayıflatılmış toplam yansıma) düzeneğiyle 4000-650 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında, 4 cm⁻¹ spektral çözünürlükte ve 64 tarama ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Değerlendirmede O-H gerilme (3600-3200 cm⁻¹), karboksilik/karbonil C=O (1750-1650 cm⁻¹) ve alifatik C-H deformasyon (R-H, yaklaşık 1415 cm⁻¹) bantlarının geçirgenlik değerleri esas alınmıştır. Kömürler arasında yüzey hidrofilik/hidrofobik dengesini karşılaştırmak amacıyla, geçirgenlik (T) değerlerinden $A = -\log(T/100)$ bağıntısıyla elde edilen bağıl soğurma değerleri kullanılarak bağıl hidrofiliklik indeksi $H_I^* = [(-\text{COOH}) + 2(-\text{OH})] / (\text{R-H})$ biçiminde hesaplanmıştır (Celik ve Seyhan, 1995; Çınar, 2009). Bu tanımda pay, su ile hidrojen bağı kurabilen oksijenli (hidrofilik) grupların bant şiddetini; payda ise kömürün alifatik hidrokarbon (hidrofobik) iskeletini temsil etmektedir; dolayısıyla H_I^* değeri büyüdükçe yüzeyin su seven karakteri, küçüldükçe hidrofobik karakteri baskınlaşmaktadır. İndeksin payındaki -COOH ve -OH bantları yüzeyin polar/hidrofilik bileşenlerini, paydasındaki alifatik C-H (R-H) bandı ise apolar/hidrofobik hidrokarbon iskeletini temsil eder; -OH terimi, Celik ve Seyhan (1995) ile Çınar (2009)'da izlenen biçimde iki kat ağırlıklandırılmıştır.

2.6. Veri Değerlendirme

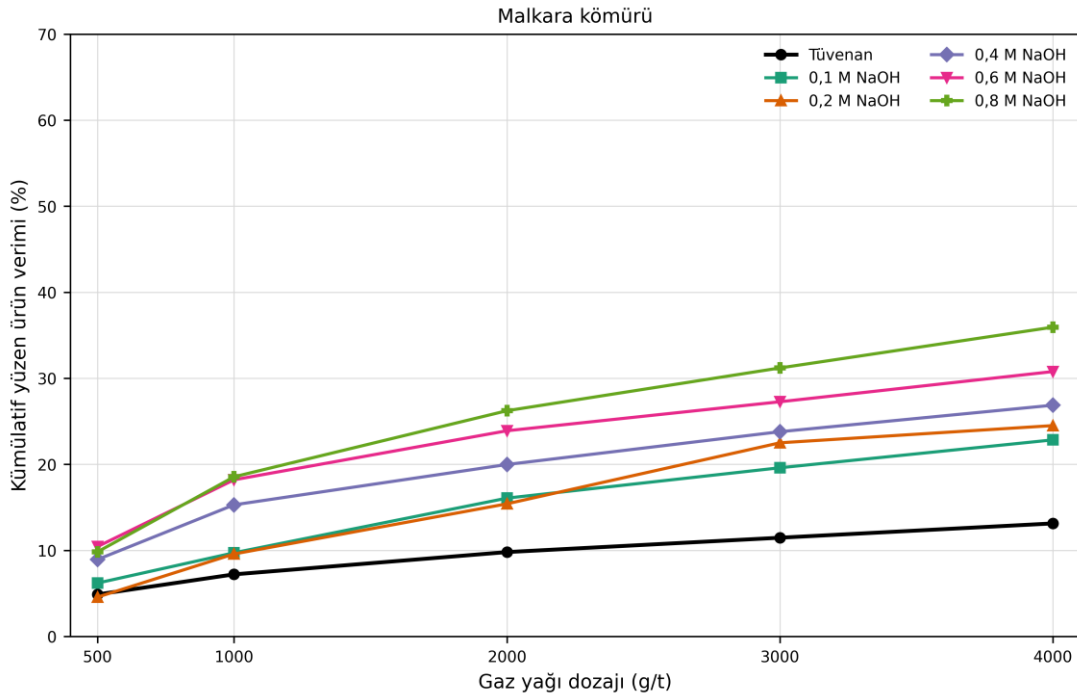
Her kömür için tüvenan numunenin flotasyon eğrisi referans alınmış ve alkali yıkama sonrasında elde edilen eğrilerle karşılaştırılmıştır. Değerlendirmede özellikle 4000 g/t gaz yağı dozajındaki verim, eğrinin tüm dozaj aralığındaki konumu ve NaOH molaritesine bağlı değişim dikkate alınmıştır. Alkali koşulun iyileştirici veya bozucu etkisi, tüvenan numuneye göre verim oranı ve mutlak verim değişimi birlikte değerlendirilerek yorumlanmıştır. Muamele sonu ve yıkama sonrası pulp pH değerleri kayıt altına alınmış olup Bölüm 3.3'te sunulmaktadır; buna karşılık flotasyon hücresindeki pulpun pH'ı ayrıca izlenmemiştir. Bu nedenle flotasyon

ortamındaki iyonik koşullara ilişkin açıklamalar kısmen dolaylı değerlendirmelere dayanmaktadır.

3. BULGULAR

3.1. Malkara Kömürü

Malkara kömürü tüvenan halde düşük bir flotasyon yanıtı sergilemiştir (Görsel 1). Tüvenan numunede 4000 g/t gaz yağı dozajındaki verim %13,13 iken, verim NaOH molaritesiyle kademeli ve tekdüze biçimde artmış (0,1 M'de %22,8; 0,4 M'de %26,9; 0,6 M'de %30,8) ve 0,8 M koşulunda %35,94'e ulaşmıştır. Bu artış yaklaşık 2,74 katlık oransal iyileşmeye karşılık gelmektedir. Bu bulgu, Malkara kömüründe hümik bileşenlerin bir kısmının giderilmesinin flotasyon yanıtını iyileştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte mutlak verim düzeyinin sınırlı kalması, yüzey ıslanabilirliğinde sağlanan iyileşmenin flotasyon verimine bütünüyle yansımadığını; tane özellikleri ve mineral madde içeriğinin de yanıtı belirlediğini düşündürmektedir.

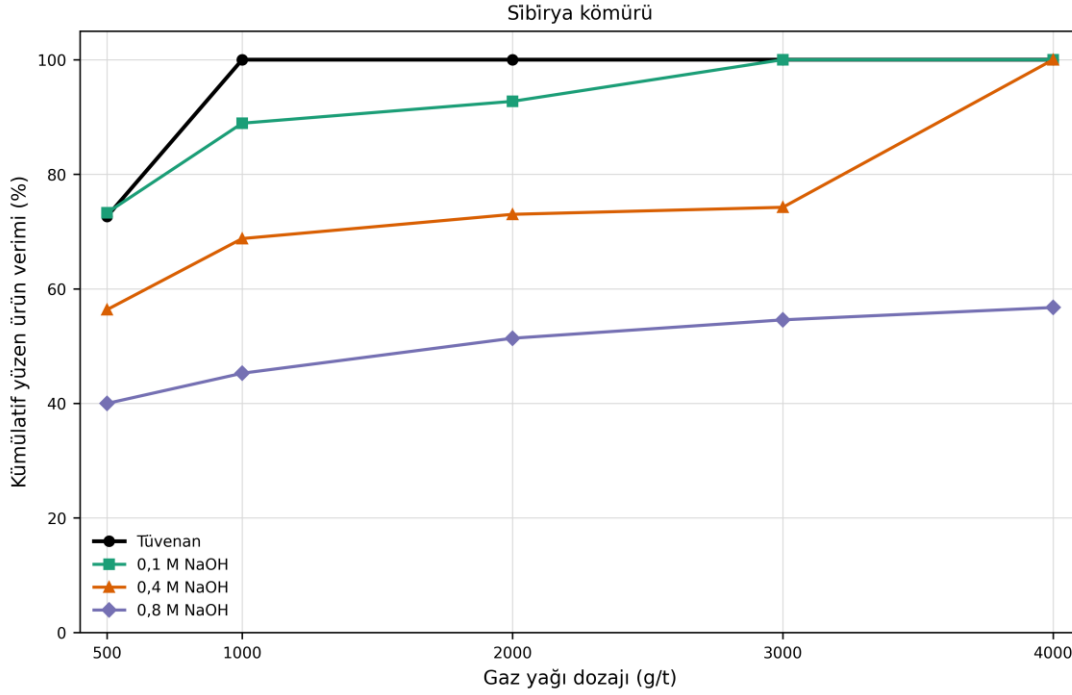


Görsel 1. Malkara kömüründe NaOH ile alkali yıkama sonrası gaz yağı dozajına bağlı kümülatif yüzen ürün verimi.

3.2. Sibirya Kömürü

Sibirya kömürü tüvenan halde çok yüksek flotasyon verimi göstermiş ve 1000 g/t gaz yağı dozajından itibaren %100 verime ulaşmıştır (Görsel 2); bu değer numunenin tamamının yüzen ürüne geçtiğini, dolayısıyla söz konusu koşulda kütle esaslı bir ayırma gerçekleşmediğini göstermektedir. Alkali yıkama bu numunede iyileştirici etki oluşturmamış, tersine verimi düşürmüştür. 0,4 M koşulunda eğri 500–3000 g/t aralığında %56–74 bandında bastırılmış seyretmiş ve ancak 4000 g/t dozajda %100'e ulaşabilmiştir; 4000 g/t'de de süren kalıcı gerileme yalnızca 0,8 M koşulunda gözlenmiş, bu koşulda verim %56,74'te kalmıştır. Doğal hidrofobikliği yüksek olan bu kömürde hidrofobik karakterin zayıflamasına yol açabilecek olası

mekanizmalar şunlardır: alkali ortamda yüzeyde polar fonksiyonel grupların oluşması, çözünmüş hümit türlerin yeniden adsorplanması ve doğal hidrofobik yüzey bölgelerinin etkinliğinin azalması.



Görsel 2. Sibiry kömüründe NaOH ile alkali yıkama sonrası gaz yağı dozajına bağlı kümülatif yüzen ürün verimi.

3.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme

İki kömürün 4000 g/t gaz yağı dozajındaki tüvenan verimleri ile alkali yıkama yanıtını temsil eden seçilmiş koşullar Çizelge 1’de karşılaştırılmıştır. Malkara kömüründe alkali yıkama flotasyon verimini kayda değer ölçüde artırırken, Sibiry kömüründe aynı yaklaşım verim kaybına neden olmuştur. Bu zıt davranış, alkali yıkamanın tüm kömür tipleri için geçerli evrensel bir ön muamele olarak değerlendirilmemesi gerektiğini; kömürleşme derecesi, hümit madde dağılımı, yüzey organik bileşimi ve alkali ortamdaki yapısal kararlılık ile birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 1. 4000 g/t gaz yağı dozajında tüvenan ve alkali yıkama yanıtını temsil eden seçilmiş koşullardaki flotasyon verimlerinin karşılaştırılması.

Numune	Tüvenan verim (%)	Alkali koşul	Alkali verim (%)	Verim oranı	Etki
Malkara	13,13	0,8 M	35,94	2,74×	Olumlu
Sibiry	100,00	0,8 M	56,74	0,57×	Olumsuz

Muamele ve yıkama aşamalarında izlenen pulp pH değerleri de iki kömür arasındaki ayrımı desteklemektedir (Çizelge 2). Malkara’da bir saatlik karıştırma sonunda ölçülen pH değerleri, aynı derişimlerdeki taze NaOH çözeltilerinin teorik pH değerlerinin belirgin biçimde altındadır (örneğin 0,8 M için 12,45’e karşılık yaklaşık 13,9; 0,1 M için 9,09’a karşılık yaklaşık

13,0); aradaki fark, OH^- iyonlarının kömürdeki asidik (karboksilik/fenolik) grupların nötralizasyonu ve hümit maddelerin çözünmesi sırasında tüketildiğine işaret etmektedir. Tekrarlı su yıkamasının ardından Malkara'da pulp pH'ı tüm koşullarda 7,37-9,50 aralığına gerileyerek nötre yaklaşmış, kalıntı alkalinitenin büyük ölçüde uzaklaştırıldığını göstermiştir. Buna karşılık Sibiry'a'da aynı yıkama protokolüne karşın yıkama sonrası pH 10,2-11,12 aralığında kalmış ve NaOH derişimiyle yükselmiştir; aynı derişimde (0,1 M) Malkara'nın 7,37'ye inmesine karşılık Sibiry'a'nın 10,2'de kalması bu ayrımı doğrudan karşılaştırılabilir kılmaktadır; verim kaybının en belirgin olduğu 0,8 M koşulunun en yüksek yıkama sonrası pH ile çakışması dikkat çekicidir. İşlem görmemiş Sibiry'a numunesinin doğal süspansiyon pH'ının 6,75-6,90 aralığında (nötre yakın) ölçülmesi, yıkama sonrası bu değerlerin kömürün doğal durumundan değil, muameleden kalan alkaliniteden kaynaklandığını ayrıca doğrulamaktadır.

Çizelge 2. Alkali muamele ve yıkama aşamalarında ölçülen pulp pH değerleri. Teorik pH, kömür eklenmemiş taze NaOH çözeltisinin hesaplanan değeridir (25 °C); “—” ile gösterilen koşullarda ölçüm alınmamıştır. İşlem görmemiş Sibiry'a numunesinin doğal süspansiyon pH'ı 6,75-6,90 aralığındadır. Sibiry'a karşılaştırma numunesi olduğundan pH izlemesi seçilmiş derişimlerde yapılmıştır.

NaOH derişimi	Teorik pH	Malkara — karıştırma sonrası	Malkara — yıkama sonrası	Sibiry'a — yıkama sonrası
0,1 M	~13,0	9,09	7,37	10,2
0,2 M	~13,3	9,95	9,50	—
0,4 M	~13,6	11,68	8,77	10,4
0,6 M	~13,8	12,40	9,20	—
0,8 M	~13,9	12,45	9,27	11,12

3.4. FTIR Bulguları

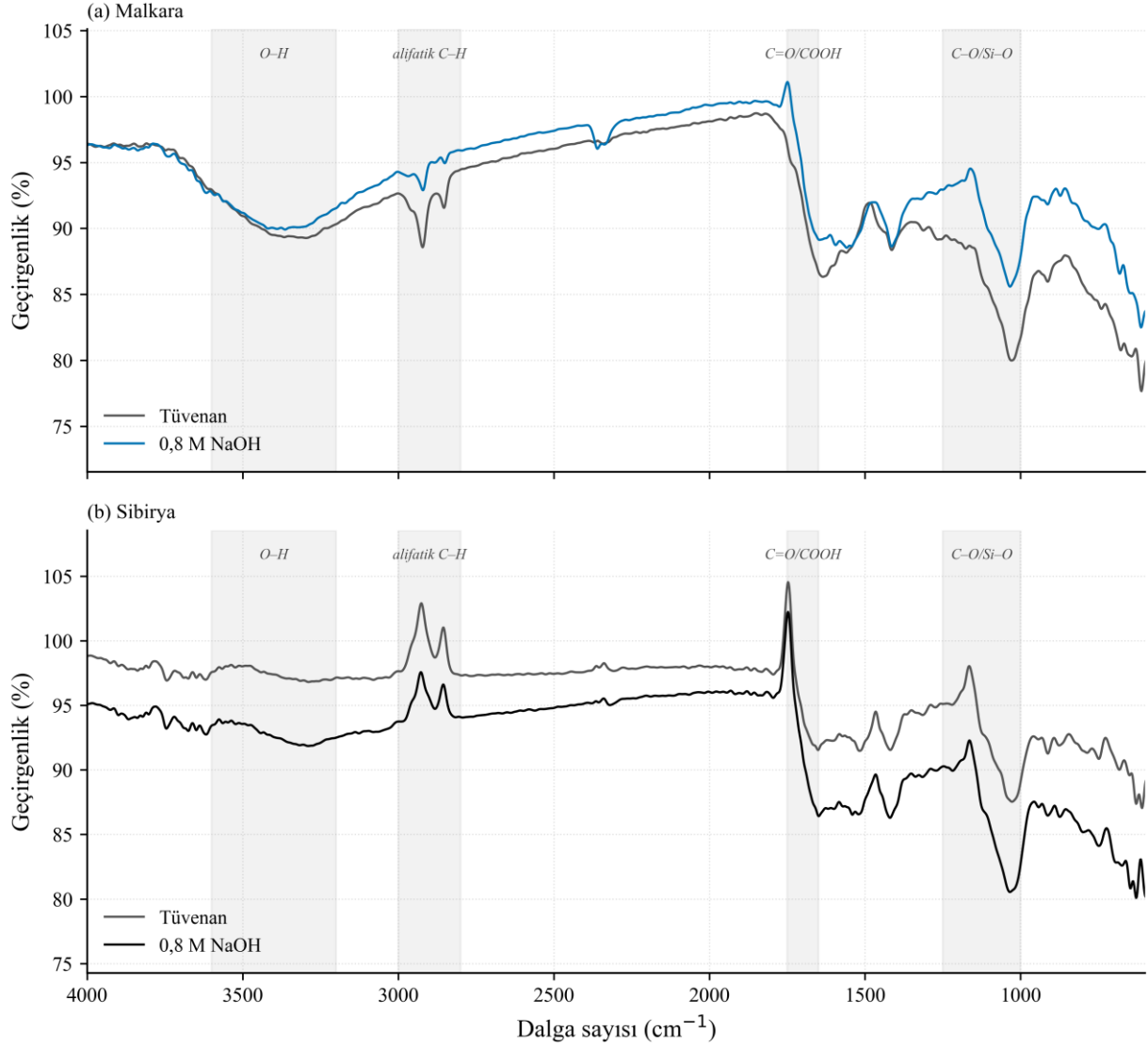
Tüvenan ve 0,8 M NaOH ile yıkanmış numunelerin FTIR spektrumlarında, O-H gerilme titreşimleri ($3600\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$) ile karboksilik/karbonil (C=O / COOH) gruplarına ($1750\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$) ait soğurma şiddetleri incelenmiştir. Sibiry'a kömürünün tüvenan halinde O-H gerilmesi ($3288,09\text{ cm}^{-1}$) geçirgenliği %96,81, C=O geçirgenliği ise %91,54 olarak ölçülmüştür. Malkara kömüründe aynı bantların geçirgenlikleri (O-H: $3295,80\text{ cm}^{-1}$ / %89,27; C=O : $1650,79\text{ cm}^{-1}$ / %86,79) belirgin biçimde daha düşüktür; geçirgenliğin düşük olması, ilgili polar grupların soğurma şiddetinin yüksek olduğunu gösterir.

Bu bantlardan, Celik ve Seyhan (1995) ile Çınar (2009)'da izlenen yaklaşımla bağlı hidrofiliklik indeksi (HI^*) hesaplanmıştır. HI^* , mutlak bir büyüklük değil, yalnızca numuneler arası karşılaştırmaya uygun bağlı bir ölçüttür; Çınar'ın difüz yansıma (Kubelka-Munk) temelli mutlak değerleriyle doğrudan kıyaslanamaz. Aromatik C-H bandı (yaklaşık 3030 cm^{-1}) linyitlerde ihmal edilebilir düzeyde olduğundan hesaba katılmamıştır. Çizelge 3'te görüldüğü gibi, tüvenan flotasyon verimi düşük olan Malkara kömürü yüksek bir HI^* değeri (2,98), tüvenan verimi yüksek olan Sibiry'a kömürü ise düşük bir HI^* değeri (1,73) vermiştir.

Çizelge 3. Malkara ve Sibiryâ kömürlerinin tüvenan ve 0,8 M NaOH ile yıkanmış numunelerine ait FTIR bağıl soğurma değerleri ve hesaplanan bağıl hidrofiliklik indeksi (HI); flotasyon verimleri 4000 g/t gaz yağı dozajına aittir.*

Kömür	A(-OH)	A(-COOH)	A(R-H)	HI*	Verim (%)
Sibiryâ	0,0141	0,0384	0,0384	1,73	100,00
Sibiryâ (0,8 M NaOH)	0,0369	0,0632	0,0640	2,14	56,74
Malkara	0,0493	0,0615	0,0537	2,98	13,13
Malkara (0,8 M NaOH)	0,0462	0,0497	0,0524	2,71	35,94

Aynı yaklaşım 0,8 M NaOH ile yıkanmış numunelerin spektrumlarına da uygulanmış; Malkara'da indeks 2,98'den 2,71'e gerilerken, Sibiryâ'da 1,73'ten 2,14'e yükselmiştir. Her koşul için tek spektrum değerlendirildiğinden bu kaymalar, indeksin ölçüm belirsizliğiyle karşılaştırılabilir büyüklüktedir; bu nedenle tek başına kanıt olarak değil, flotasyon ve temas açısı bulgularıyla aynı yöndeki bir spektral eğilim olarak yorumlanmıştır. Tüvenan ve yıkanmış numunelere ait spektrumların karşılaştırması Görsel 3'te verilmiştir: yıkama sonrasında Malkara spektrumunda O-H gerilme ve karboksil/karbonil C=O bölgelerindeki bağıl şiddetler zayıflarken, Sibiryâ spektrumunda aynı bölgeler belirginleşmektedir.



Görsel 3. Malkara ve Sibirya kömürlerinin tüvenan ve 0,8 M NaOH ile yıkanmış numunelerine ait FTIR spektrumlarının karşılaştırılması. O-H gerilme ($3600-3200\text{ cm}^{-1}$) ve karboksil/karbonil $C=O$ ($1750-1650\text{ cm}^{-1}$) bölgelerindeki bağıl şiddet değişimleri alkali yıkamanın iki kömürdeki zıt yönlü etkisini yansıtmaktadır: Malkara'da hidrofilik bant şiddetleri zayıflarken (H_I^* 2,98→2,71), Sibirya'da oksijenli grupların bağıl payı artmaktadır (H_I^* 1,73→2,14).

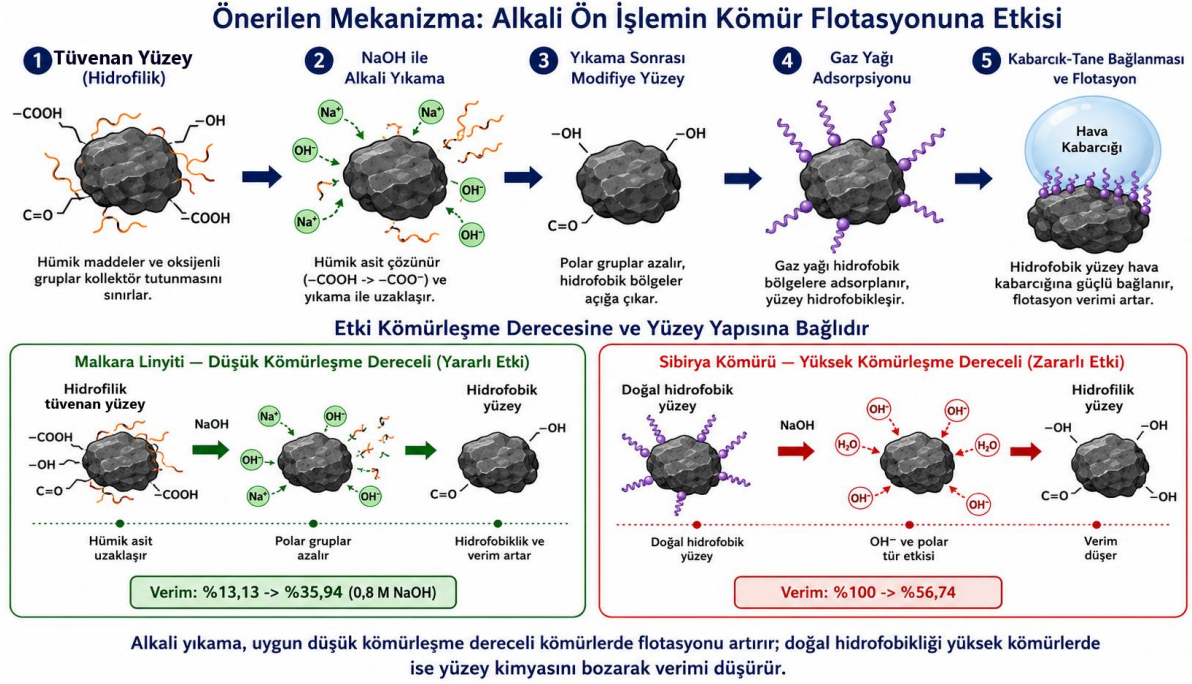
3.5. Temas Açısı Bulguları

Su damlası temas açısı ölçümleri iki kömürde zıt yönlü değişim ortaya koymuştur. Malkara kömürünün tüvenan yüzeyinde su damlası neredeyse tümüyle yayılmış ve temas açısı yaklaşık $3,1^\circ$ düzeyinde kalmış; 0,8 M NaOH ile yıkama sonrasında bu değer yaklaşık $109,8^\circ$ 'ye yükselmiştir. Sibirya kömüründe ise tüvenan yüzeyde yaklaşık $127,0^\circ$ olan temas açısı, alkali yıkama sonrasında yaklaşık $110,3^\circ$ 'ye gerilemiştir. Böylece alkali yıkama, Malkara yüzeyini belirgin biçimde hidrofobikleştirirken Sibirya yüzeyinin ıslanabilirliğini artırmıştır.

4. TARTIŞMA

Elde edilen sonuçlar, alkali yıkama ön muamelesinin temel etkisinin hümkik madde-yüzey hidrofilikliği ilişkisi üzerinden açıklanabileceğini göstermektedir. Düşük kömürleşme dereceli kömürlerde hümkik asit ve oksijenli fonksiyonel gruplar, su ile güçlü etkileşim kurarak

gaz yağı adsorpsiyonunu ve hava kabarcığına bağlanmayı sınırlandırmaktadır. Bu değerlendirme, hümitik asidin yüzeye adsorplanarak temas açısını düşürdüğünü ve zeta potansiyelini daha negatif hale getirdiğini bildiren Laskowski vd.'nin (1986) bulgularıyla uyumludur. NaOH muamelesi sırasında hümitik asitlerin alkali ortamda çözünmesi ve su ile yıkama yoluyla kısmen uzaklaştırılması, hem kömür yüzeyindeki polar/hidrofilik bileşenlerin azalmasına hem de pulp fazında kollektör tüketen ve tane-kabarcık bağlanmasını baskılayan hümitik türlerin ortamdaki uzaklaştırılmasına katkı sağlayabilir. Malkara kömüründe gözlenen verim artışı bu mekanizmalarla ilişkilendirilebilir (Görsel 4).



Görsel 4. NaOH ile alkali yıkamanın linyit flotasyonunda yüzey hidrofilikliği, kollektör adsorpsiyonu ve kabarcık-tane bağlanması üzerindeki önerilen etki mekanizması; etkinin kömürleşme derecesi ve yüzey yapısına bağlı değişimi. Şemadaki Sibirya kolunda gösterilen hidrofiliklik artışı görelidir: alkali yıkama sonrasında yüzeyin ıslanabilirliği artmakla birlikte temas açısı $110,3^\circ$ düzeyinde kalmakta, yani yüzey hidroforik karakterini sürdürmektedir (bkz. Bölüm 3.5 ve 4).

FTIR bulguları bu mekanizmayla uyumludur. Tüvenan Malkara yüzeyinde O-H ve C=O bantlarının belirgin soğurma şiddetleri polar grup yoğunluğunun yüksek olduğunu, Sibirya'daki zayıf soğurmalar ise polar grupların oldukça sınırlı kaldığını göstermektedir (Çizelge 3). İki uç örnek arasındaki karşıtlık, yüzeydeki polar grup yoğunluğu ile doğal flotlanabilirlik arasındaki ters ilişkiyi ortaya koymaktadır: en yüksek HI^* değerine sahip Malkara en düşük tüvenan verimi (%13,13), en düşük HI^* değerine sahip Sibirya en yüksek tüvenan verimi (%100) vermiştir. Bu karşıtlık, hidrofiliklik indeksinin flotasyon yanıtıyla ters ilişkili olduğunu bildiren Çınar (2009) ile uyumludur. Alkali yıkamanın çözünebilir hümitik ve polar bileşenleri kısmen uzaklaştırıp ilgili pik şiddetlerini azaltması, hümitik türlerin flotasyon ortamındaki baskılayıcı ve kollektör tüketen etkisini hafifletmekte ve Malkara kömüründe gözlenen verim artışıyla ilişkilendirilmektedir. Aynı Malkara linyitinde farklı bir ön muamele olan düşük sıcaklık ısıtma işleminin de yüzey hidrofilikliğini azalttığı ve FTIR pik şiddetlerinden hesaplanan hidrofiliklik indeksini 105°C 'de dört saatlik işlem sonrasında 17,25'ten 2,87'ye düşürdüğü gösterilmiştir.

(Çınar, 2009); bu sonuç, polar fonksiyonel grupların uzaklaştırılmasının flotasyon verimini artırdığı yönündeki değerlendirmeyi bağımsız biçimde desteklemektedir.

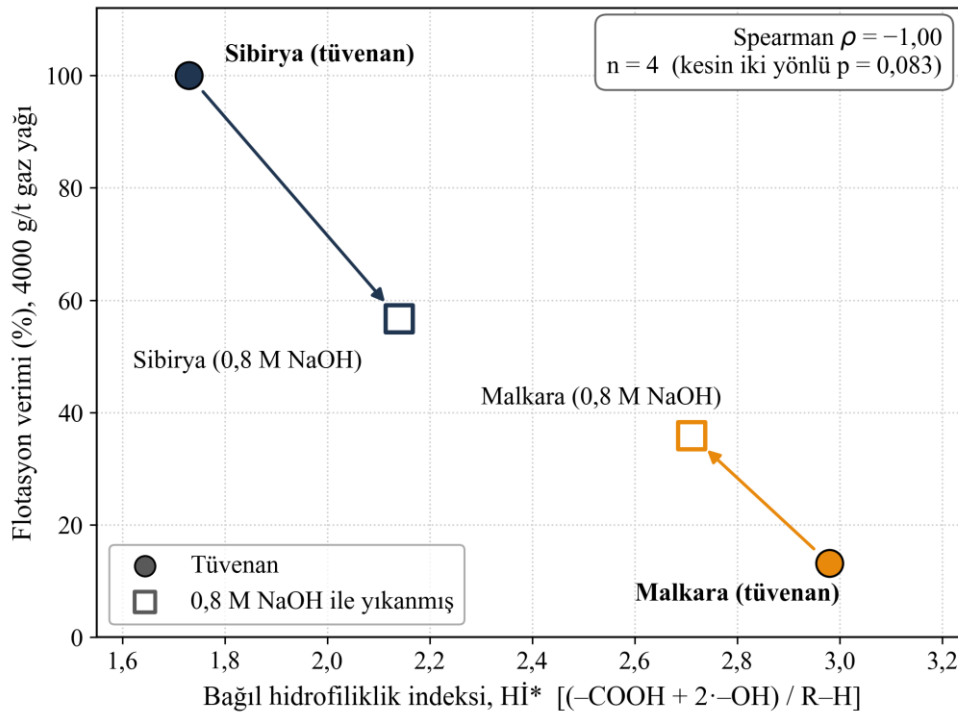
Malkara kömüründe temas açısının $3,1^\circ$ 'den $109,8^\circ$ 'ye yükselmesi, alkali yıkamanın kömür yüzeyindeki hidrofilik hümkik bileşenleri kısmen uzaklaştırarak yüzeyi hidrofobik hale getirdiğini ve gözlenen flotasyon verimi artışıyla uyumlu olduğunu doğrulamaktadır. Tüvenan yüzeyin bu denli kolay ıslanması, numunenin yüksek bağıl hidrofiliklik indeksiyle ve düşük tüvenan flotasyon verimiyle örtüşmektedir. Buna karşılık yüzey belirgin biçimde hidrofoblaşmasına rağmen verimin %35,94 düzeyinde kalması, kömür yüzeyinde oksijenli gruplar, mineral madde ve heterojen organik yapı birlikte bulunduğu yalnızca hümkik fraksiyonun kısmen uzaklaştırılmasının flotasyon yanıtını sınırlı ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir. Tane boyutu dağılımı ve mineral madde içeriği gibi etkenler de flotasyon yanıtını ayrıca sınırlandırmaktadır (Crawford ve Ralston, 1988).

Sibirya kömüründe alkali yıkamanın verimi düşürmesi farklı bir mekanizmaya işaret etmektedir. Tüvenan halde yüksek flotasyon verimi gösteren ve doğal hidrofobikliği güçlü olan kömürlerde alkali muameleye gereksinim bulunmayabilir. Bu tür yüzeylerde OH^- adsorpsiyonu veya çözünmüş organik/polar türlerin yüzeyde kalması, doğal hidrofobik karakteri zayıflatılabilir. Firth ve Nicol (1981), Laskowski vd. (1986), Lai vd. (1989) ile Arnold ve Aplan'ın (1986) hümkik maddelerin flotasyon ortamında kömür kazanımını düşürebildiğine ilişkin bulguları bu gözlemle niteliksel olarak uyumludur. pH ölçümleri bu değerlendirmeyi nicel olarak desteklemektedir: hümkikçe zengin Malkara'da asidik yüzey grupları alkaliyi tamponlayarak tüketmekte ve yıkama sonrası pulp pH'ı 7,37-9,50 aralığına inmekte; tamponlayıcı grupları sınırlı olan Sibirya'da ise kalıntı alkalinite yüksek kalmaktadır (yıkama sonrası pH 10,2-11,12). Bu bulgu, Sibirya'daki verim kaybında kalıntı alkalinitenin ve alkali ortamda yüzeyde kalan polar türlerin payını doğrudan ölçümle desteklerken, Malkara'daki iyileşmenin kalıntı alkali kaynaklı bir yapay etki olmadığını da ortaya koymaktadır.

Temas açısı bulguları (Bölüm 3.5) bu değerlendirmeye uyumludur: Sibirya yüzeyinde ölçülen yaklaşık 17° 'lik azalma, alkali ortamda yüzeyin daha ıslanabilir bir karakter kazandığını göstermektedir. Bununla birlikte $110,3^\circ$ temas açısına sahip bir yüzey hâlâ belirgin biçimde hidrofobik olduğundan, açıda bu azalma tek başına verimdeki 43 puanlık düşüşü açıklamaya yetmemektedir. Nitekim kabarcık–tane tutunmasının termodinamik itici gücünün, yani kabarcığın yüzeye tutunmasıyla elde edilen serbest enerji kazancının, $(1 - \cos \theta)$ büyüklüğü ile orantılı olduğu kabul edilir (θ : temas açısı). Bu ölçekte $127,0^\circ$ 'den $110,3^\circ$ 'ye gerileme itici gücü 1,60'tan 1,35'e (yaklaşık %16) düşürmektedir; oysa verim kaybı yaklaşık 43 puandır. Söz konusu hesap, birleştirilerek hazırlanmış yüzeylerde ölçülen görünür açılara dayandığından (Bölüm 2.4) mutlak değil göreceli bir karşılaştırma niteliğindedir. Kalan farkta üç etkenin rol oynadığı düşünülmektedir: yüzeyde tutunan çözünmüş polar ve hümkik türler, ıslanma histerезisi (durağan damla ölçümü, ilerleyen ve gerileyen açılar arasındaki fark nedeniyle dinamik flotasyon ortamındaki gerçek ıslanma davranışını tam yansıtamaz) ve gözenek yapısındaki değişimler. Önerilen mekanizmanın nicel olarak doğrulanması için zeta potansiyeli ve kütle kaybı ölçümleri gerekmektedir.

HI^* ile flotasyon verimi arasındaki zıt yönlü ilişki Görsel 5'te özetlenmiştir. Görseldeki oklar, her kömürün tüvenan durumdan 0,8 M NaOH ile yıkanmış duruma geçişini

göstermektedir; iki kömür HI^* ekseninde zıt yönlerde hareket ederek birbirine yaklaşmıştır. Dört gözlem (iki kömür $\times$ tüvenan/yıkanmış iki durum) üzerinden hesaplanan ve değişkenler arasındaki sıra ilişkisinin gücünü ölçen Spearman korelasyonu, ilişkinin kusursuz biçimde ters yönlü olduğunu göstermektedir ($\rho = -1,00$). Ancak kesin permütasyon testi $p = 0,083$ ($n = 4$) düzeyinde kalmıştır; bu, dört gözlemle iki yönlü sınamada ulaşılabilecek en küçük p değeridir. Dolayısıyla anlamlılık eşiğinin aşılamaması ilişkinin zayıflığından değil, örneklem büyüklüğünün doğal sınırından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle söz konusu ilişki istatistiksel bir kanıt olarak değil, eğilim düzeyinde bir bulgu olarak yorumlanmalıdır. Bununla birlikte üç bağımsız yöntem — FTIR temelli bağıl hidrofiliklik indeksi, su temas açısı ve 4000 g/t dozajdaki flotasyon verimi — iki kömürü ve muamelenin etki yönünü aynı biçimde sıralamaktadır. Eksenin hidrofilik ucunda tüvenan Malkara (HI^* 2,98; temas açısı $3,1^\circ$; verim %13,1), hidrofobik ucunda tüvenan Sibiry (1,73; $127,0^\circ$; %100) yer almakta; 0,8 M NaOH yıkaması iki kömürü bu eksen üzerinde zıt yönlerde hareket ettirmektedir. Üç farklı ölçüm ilkesinin birbirini doğrulaması, örneklem sınırlı olmasına karşın yüzeydeki polar grup yoğunluğu ile flotlanabilirlik arasındaki ters ilişkiyi güçlü biçimde desteklemektedir. Benzer bir yaklaşımın gücü bağımsız bulgularla da desteklenmektedir: ters gaz kromatografisiyle türetilen bir hidrofiliklik indeksi, beş farklı kömürde flotasyon verimiyle güçlü ters ilişki göstermiştir (Niu vd., 2018).



Görsel 5. Hidrofiliklik indeksi (HI^*) ile flotasyon verimi arasındaki ilişki. İçi dolu simgeler tüvenan, içi boş simgeler 0,8 M NaOH ile yıkanmış numuneleri, oklar ise yıkamayla geçiş yönünü gösterir (Spearman $\rho = -1,00$; kesin iki yönlü $p = 0,083$, $n = 4$).

Nitekim bu çalışmanın kendi verileri de aynı sonucu göstermektedir: alkali yıkama sonrasında iki kömürün temas açıları birbirine çok yaklaşmış (yaklaşık $109,8^\circ$ ve $110,3^\circ$), ancak flotasyon verimleri belirgin biçimde farklı kalmıştır (%35,94 ve %56,74). Bu durum, statik temas açısının verimi tek başına belirlemediğini; nihai kazanımı yüzeyin kimyasal heterojenliği

ile kabarcık–tane tutunma kinetiğinin birlikte kontrol ettiğini ortaya koymaktadır. Crawford ve Ralston (1988), belirli boyuttaki bir tanenin yüzebilmesi için gerekli en düşük temas açısını kritik temas açısı olarak tanımlamıştır. Yıkamış yüzeylerin 110° dolayındaki temas açıları bu eşiğin belirgin biçimde üzerinde kaldığından, statik açı bu bölgede koşulları birbirinden ayırt edememekte; verim, açının mutlak değerinden çok yüzeydeki hidrofilik bölgelerin yoğunluğuna ve dağılımına duyarlı hale gelmektedir. Açıların benzer bir değerde buluşması, NaOH şartlandırmasının her iki kömürün en dış yüzey kimyasını benzer bir hidrofobik duruma getirmesinin sonucudur; verim farkının nedeni ise bu yüzey kimyası değil, tanecik ölçeğindeki yapısal özelliklerdir. Bu uyumsuzluk, statik temas açısının termodinamik bir denge büyüklüğü olması, flotasyonun ise kabarcık–tane çarpışması, tutunma (aradaki sıvı filminin incelik yırtılması; indüksiyon süresi), tanenin kabarcıktan kopmadan taşınabilmesi ve köpük fazına taşınım adımlarının ortak sonucu olmasıyla ilişkilidir; bu adımların her biri belirli bir olasılıkla gerçekleşir ve nihai kazanım, bu olasılıkların çarpımıyla belirlenir (Yoon ve Luttrell, 1989; Crawford ve Ralston, 1988; Albijanic vd., 2010). Gözenek yapısının reaktifleri hapsedmesi, mineral maddenin organik matriste kilitli kalması ve yüzey pürüzlülüğünün indüksiyon süresini uzatması gibi yapısal etkenler bu farklılaşmayı açıklayabilir (Xia vd., 2013).

Bu bulgular, hümkik maddelerin flotasyon üzerindeki etkisinin tek yönlü olmadığını göstermektedir. Hümkik maddeler bir yandan karboksilik ve fenolik gruplar aracılığıyla yüzeye hidrofilik karakter kazandırarak kollektör adsorpsiyonunu ve tane-kabarcık bağlanmasını sınırlandırabilir. Diğer yandan kil ve ince mineral yüzeyleriyle etkileşerek kollektörün kömür yüzeyi yerine bu fazlarda tüketilmesine yol açabilir. Alkali yıkamanın olumlu yanıt verdiği Malkara ile olumsuz yanıt verdiği Sibiry örnekleri birlikte değerlendirildiğinde, işlem için evrensel bir optimumdan ziyade kömür tipine bağlı bir optimum işlem penceresinden söz etmek daha uygundur.

Bulgular, reaktifsiz tuzlu su flotasyonu literatürüyle de tutarlıdır. Özdemir vd. (2013), Zonguldak taşkömürünün NaCl, KCl, CaCl₂ ve MgCl₂ çözeltilerinde kollektörsüz yüzdürülebildiğini, Soma linyitinin ise hiçbir tuz koşulunda yüzdürülemediğini ve linyit için hidrofobikliğin fiziksel ya da kimyasal yollarla artırılması gerektiğini bildirmiştir. Elektriksel çift tabakanın bastırılmasına ve kabarcık birleşmesinin engellenmesine dayanan bu fizikokimyasal yol, yalnızca mevcut doğal hidrofobikliği açığa çıkarabilmektedir. Bu çalışmada doğal hidrofobikliği yüksek Sibiry kömürünün ön muamelesiz dahi yüksek verimle yüzmesi, buna karşılık Malkara kömürünün ancak yüzey kimyasını değiştiren alkali yıkama ile sınırlı iyileşme göstermesi, aynı kömürleşme derecesi bağımlılığının bağımsız bir doğrulamasıdır. Ayrıca Özdemir vd.'nin (2013) yüksek tuz konsantrasyonlarında gözlediği kül sürüklenmesi, verim artışının seçicilikten bağımsız değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışma, alkali yıkamanın kömür flotasyonunda kömüre özgü bir ön muamele olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. İşlemin başarılı olabilmesi için kömürün başlangıç hidrofobikliği, hümkik madde içeriği, alkali ortamdaki yapısal dayanımı ve yıkama verimliliği birlikte dikkate alınmalıdır. Gelecek çalışmalarda zeta potansiyeli, kütle kaybı ve tane boyutu dağılımı ölçümleriyle önerilen mekanizmaların nicel olarak doğrulanması gerekmektedir.

5. SONUÇLAR

- NaOH ile alkali yıkama, düşük kömürleşme dereceli Malkara kömüründe kümülatif yüzen ürün verimini önemli ölçüde artırmıştır; 4000 g/t gaz yağı dozajındaki verim 0,8 M NaOH koşulunda %13,13'ten %35,94'e yükselmiştir.
- Sibiry kömüründe tüvenan numunenin doğal hidrofobikliği yüksek olduğundan alkali yıkama iyileştirici etki göstermemiş; 0,8 M NaOH koşulunda verim %100 düzeyinden %56,74'e gerilemiştir. Statik temas açısı flotasyon başarımı için gerekli bir ön koşul olmakla birlikte belirleyici olan, yapısal özelliklerin şekillendirdiği kabarcık-tane yapışma kinetiğidir.
- Bulgular, hümit maddelerin flotasyonda hem yüzeyi hidrofilikleştiren hem de kollektör dağılımını değiştirebilen çift yönlü bir rol oynayabileceğini ve alkali yıkama etkisinin başlangıç yüzey kimyasına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.
- İncelenen iki kömür, FTIR temelli bağlı hidrofiliklik indeksi ile tüvenan flotasyon verimi bakımından zıt uçlarda yer almıştır; yüksek indeksli Malkara en düşük, düşük indeksli Sibiry en yüksek tüvenan verimi vermiştir. Bu karışıklık, yüzeydeki polar grup yoğunluğunun doğal flotlanabilirliği belirleyen başlıca etkenlerden biri olduğu değerlendirmesini desteklemektedir. Aynı indeks 0,8 M NaOH yıkaması sonrasında Malkara'da 2,98'den 2,71'e gerileyip Sibiry'da 1,73'ten 2,14'e yükselerek, alkali muamelenin iki kömürde yarattığı zıt yönlü yüzey değişimini de yakalamıştır.
- Temas açısı ölçümleri, yüzey ıslanabilirliğindeki değişimin önerilen mekanizmayla uyumlu olduğunu göstermiştir: Malkara kömürünün tüvenan yüzeyinde neredeyse tam ıslanma gözlenirken (yaklaşık 3,1°), alkali yıkama sonrasında temas açısı yaklaşık 109,8°'ye yükselmiş ve bu artış flotasyon verimindeki iyileşmeyle uyumlu bulunmuştur. Sibiry kömüründe ise tüvenan yüzeyde yaklaşık 127,0° olan temas açısı alkali yıkama sonrasında yaklaşık 110,3°'ye gerilemiştir; bu gerileme doğal hidrofobiklikteki zayıflamayı yansıtmakta ve gözlenen verim kaybıyla niteliksel olarak tutarlı olmakla birlikte, yüzey belirgin biçimde hidrofobik kaldığından düşüşün tamamını tek başına açıklamamaktadır.
- Sonuçlar, alkali yıkamanın yalnızca uygun düşük kömürleşme dereceli kömürlerde hümit bileşenlerin bir bölümünün giderilmesi yoluyla yararlı olabileceğini; her kömür için ayrı molarite ve yıkama optimizasyonu yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

- Akgün, M. (1993). Amasra kömürünün flotasyonunda oksitlenmenin etkisi (Yüksek lisans tezi, Tez No: 29726). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Albijanic, B., Ozdemir, O., Nguyen, A. V., & Bradshaw, D. (2010). A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 159(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.04.003>
- Arnold, B. J., & Aplan, F. F. (1986). The effect of clay slimes on coal flotation, part II: The role of water quality. *International Journal of Mineral Processing*, 17(3-4), 243-260. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(86\)90059-1](https://doi.org/10.1016/0301-7516(86)90059-1)

- BS ISO 5073. (2013). Brown coals and lignites - Determination of humic acids. British Standards Institution.
- Celik, M. S., & Seyhan, K. (1995). Effect of heat treatment on the flotation of Turkish lignites. *Coal Preparation*, 16(1-2), 65-79. <https://doi.org/10.1080/07349349508905242>
- Crawford, R., & Ralston, J. (1988). The influence of particle size and contact angle in mineral flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 23(1-2), 1-24. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(88\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0301-7516(88)90002-6)
- Çevik, D. (2022). Polyak Eynez linyit kömürünün zenginleştirilmesi için optimum flotasyon koşullarının araştırılması (Yüksek lisans tezi, Tez No: 770089). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Çınar, M. (2009). Floatability and desulfurization of a low-rank (Turkish) coal by low-temperature heat treatment. *Fuel Processing Technology*, 90(10), 1300-1304. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.06.017>
- Firth, B. A., & Nicol, S. K. (1981). The influence of humic materials on the flotation of coal. *International Journal of Mineral Processing*, 8(3), 239-248. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(81\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0301-7516(81)90014-4)
- Lai, R. W., Wen, W. W., & Okoh, J. M. (1989). Effect of humic substances on the flotation response of coal. *Coal Preparation*, 7(1-2), 69-83. <https://doi.org/10.1080/07349348908960543>
- Laskowski, J. S., Sirois, L. L., & Moon, K. S. (1986). Effect of humic acids on coal flotation. Part I. Coal flotation selectivity in the presence of humic acids. *Coal Preparation*, 3(3-4), 133-154. <https://doi.org/10.1080/07349348608905280>
- Niu, C., Xia, W., & Peng, Y. (2018). Analysis of coal wettability by inverse gas chromatography and its guidance for coal flotation. *Fuel*, 228, 290-296. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.146>
- Özdemir, O., Çinku, K., Uslu, T., Kılıç, E., & Çelik, M. S. (2013). Taşkömürü ve linyit kömürlerinin tuzlu su içerisinde flotasyon davranışları. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 1-14.
- Seyhan, K. (1994). Türk linyitlerinin ısıtma işlemiyle yüzebilirliklerinin iyileştirilmesi (Yüksek lisans tezi, Tez No: 39677). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Somasundaran, P., & Wang, D. (2006). *Solution chemistry: Minerals and reagents (Developments in Mineral Processing, Cilt 17)*. Elsevier.
- Xia, W., Yang, J., & Liang, C. (2013). A short review of improvement in flotation of low rank/oxidized coals by pretreatments. *Powder Technology*, 237, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.017>
- Yoon, R. H., & Luttrell, G. H. (1989). The effect of bubble size on fine particle flotation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5(1-4), 101-122. <https://doi.org/10.1080/08827508908952646>

FORMULATION DEVELOPMENT AND SAFETY CHARACTERIZATION OF A NATURAL BOTANICAL HAIR CARE OIL

Sibel DIKMEN KUCUK ¹

¹ Duzce University, Coordination Office of Specialization in Environmental and Health
Technologies, 0000-0002-7852-5128

ABSTRACT

In this study, a multi-component cosmetic hair care oil formulation composed of natural botanical oils was developed, and its safety characterization was comprehensively evaluated. The formulation consists of apricot kernel oil (15%), argan oil (15%), jojoba oil (15%), sweet almond oil (15%), castor oil (10%), squalane (10%), coco-caprylate (10%), sachal inchi oil (6%), horse chestnut oil (0.5%), vitamin E (1%), rosemary essential oil (1%), and a natural preservative system (Lexgard Natural, 1.5%). Safety assessment was carried out through three complementary analytical approaches: stability analysis, microbiological analysis, and antimicrobial efficacy (challenge) testing. In the stability study, the formulation was monitored over a 3-month period at both 25°C and 40°C; parameters including color, odor, appearance, density, packaging integrity, and phase separation were evaluated. All parameters remained stable throughout the study period, no phase separation was detected, and density variations were negligible. Microbiological analysis results demonstrated that total aerobic mesophilic microorganism and yeast-mold counts were below 10 cfu/g, with *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, and *Candida albicans* not detected, confirming full compliance with cosmetic microbiological guidelines. In the antimicrobial efficacy test conducted in accordance with TS EN ISO 11930:2019, the formulation met Criterion A for all test microorganisms, including *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Candida albicans*, and *Aspergillus brasiliensis*. These results demonstrate that the developed plant-based hair care oil formulation is both microbiologically safe and physicochemically stable, confirming its suitability for cosmetic commercial application.

Keywords: Hair care oil, Formulation development, Stability, Antimicrobial efficacy, Microbiological safety.

1. INTRODUCTION

The global demand for natural and plant-derived cosmetic products has grown substantially in recent years, driven by increasing consumer awareness regarding the potential adverse effects of synthetic chemicals and a broader societal shift toward clean beauty and sustainability. The natural hair care products market, valued at approximately USD 4.51 billion in 2024, is projected to reach USD 16 billion by 2030, reflecting a compound annual growth rate of 6.5% [1]. This growth is largely attributed to rising consumer preference for botanical, sulfate-free, paraben-free, and mineral oil-free formulations that offer both efficacy and safety [2].

Hair oils represent one of the most rapidly growing segments within the natural cosmetics industry. Consumers increasingly seek multi-functional hair care solutions that address common concerns such as dryness, hair loss, scalp irritation, and oxidative damage caused by environmental pollutants, UV exposure, heat styling, and chemical treatments [2]. In response to these demands, formulators have turned to plant-based carrier oils, bioactive extracts, and essential oils as key functional ingredients in hair care formulations [3].

Among the widely studied botanical oils, apricot kernel oil (*Prunus armeniaca*) is recognized for its lightweight texture, rich content of oleic and linoleic fatty acids, and vitamins A and E, which collectively provide moisturizing, emollient, and antioxidant benefits to hair and scalp [4, 5]. Argan oil (*Argania spinosa*), often referred to as "liquid gold," is a rich source of essential fatty acids and tocopherols and has been demonstrated to penetrate the hair shaft, restore damaged hair follicles, and impart shine and manageability [6, 7]. Jojoba oil (*Simmondsia chinensis*) is structurally unique in that it is composed almost entirely (~98%) of wax esters, making it structurally similar to the natural sebum produced by the scalp; it is widely used in cosmetics for its ability to nourish and protect the hair fiber [8]. Sweet almond oil (*Prunus amygdalus dulcis*) is a well-established cosmetic ingredient valued for its balanced oleic/linoleic acid profile and its ability to smooth hair cuticles and restore the hydrolipidic film of the hair shaft [9]. Castor oil (*Ricinus communis*), composed of approximately 90% ricinoleic acid, has demonstrated antimicrobial and anti-inflammatory properties and is known to improve hair luster and support scalp health [10, 11]. Squalane, a stable, hydrogenated derivative of plant-derived squalene, is widely used in cosmetic formulations as a lightweight, biomimetic emollient that integrates into the skin and hair lipid barrier, enhancing spreadability without a greasy residue [12]. Coco-caprylate, a natural ester derived from coconut oil, provides excellent emollient properties and a non-greasy, light skin feel, making it a preferred alternative to

mineral oils in natural cosmetic formulations [13]. Sacha inchi oil (*Plukenetia volubilis*), sourced from the Amazonian region, is exceptionally rich in omega-3 (α -linolenic acid, ~48–52%), omega-6 (linoleic acid, ~24–34%), and omega-9 fatty acids, as well as vitamins A and E, making it a potent ingredient for deep hydration, scalp nourishment, and protection against environmental damage [14, 15].

In addition to these carrier oils, the formulation incorporates targeted bioactive functional ingredients. Horse chestnut oil (*Aesculus hippocastanum*) contains aescin, a triterpene saponin mixture with recognized anti-inflammatory, antioxidant, and circulation-boosting properties that promote improved blood flow to the scalp, thereby supporting nutrient delivery to hair follicles and alleviating scalp irritation [16, 17]. Rosemary essential oil (*Rosmarinus officinalis*) has been extensively studied for its antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial properties; a landmark randomized controlled trial by Panahi et al. demonstrated that topical rosemary essential oil was comparable in efficacy to 2% minoxidil in increasing hair count in patients with androgenetic alopecia over a six-month period [18]. Vitamin E (tocopherol) serves as a potent lipid-soluble antioxidant that protects hair follicles and keratin from oxidative degradation, reinforces the hair shaft, and improves tactile softness and manageability [19]. The formulation is preserved with Lexgard Natural, a naturally derived preservative system designed to ensure product safety and microbial stability while complying with clean beauty standards.

Despite the growing body of literature on individual botanical oils, comprehensive multi-component hair oil formulations that combine carrier oils, active botanical extracts, and essential oils within a single product remain understudied, particularly with regard to their physicochemical stability and microbiological safety. The present study aimed to develop a multi-component natural botanical hair care oil formulation and to conduct a thorough safety characterization encompassing stability analysis, microbiological analysis, and antimicrobial efficacy testing in accordance with TS EN ISO 11930:2019, thereby contributing to the scientific literature on safe and effective natural cosmetic formulations.

2. EXPERIMENTAL RESEARCH

2.1. Formulation Development

The hair care oil formulation was developed as a single-phase, anhydrous system comprising twelve components selected for their complementary functional profiles. All raw materials were

weighed using a precision analytical balance and combined sequentially in a glass beaker. The components and their respective concentrations are presented in Table 1. Following addition of all ingredients, the mixture was manually blended with a glass rod until a clear, homogeneous oil was obtained. The finished product was transferred into amber glass dropper bottles and stored at room temperature, protected from direct light exposure, prior to safety testing.

Table 1. Composition of the natural botanical hair care oil formulation

Phase	Function	Component/INCI Name	% (w/w)
A	Carrier, Emollient	Apricot Kernel Oil / <i>Prunus Armeniaca</i> Kernel Oil	15
A	Carrier, Emollient	Argan Oil / <i>Argania Spinosa</i> Kernel Oil	15
A	Carrier, Emollient	Jobba Oil / <i>Simmondsia Chinensis</i> Seed Oil	15
A	Carrier, Emollient	Sweet Almond Oil / <i>Prunus Amygdalus Dulcis</i> Oil	15
A	Carrier, Emollient	Castor Oil / <i>Ricinus Communis</i> Seed Oil	10
A	Carrier, Emollient	Squalane	10
A	Emollient	Coco-Caprylate	10
A	Carrier, Emollient	Sacha Inchi Oil / <i>Plukenetia Volubilis</i> Seed Oil	6
A	Active	Horse Chestnut Oil / <i>Aesculus Hippocastanum</i> Seed Oil	0.5
A	Antioxidant	Vitamin E / Tocopherol	1
A	Fragrance, Active	Rosemary Essential Oil / <i>Rosmarinus Officinalis</i> Leaf Oil	1
A	Preservative	Lexgard Natural	1.5

2.2. Physicochemical Characterization

Organoleptic properties of the formulation including color, odor, and physical appearance were assessed visually and sensorially by trained observers under standardized laboratory lighting conditions. Since the formulation is anhydrous in nature, pH measurement was not applicable. Density was determined gravimetrically by measuring the mass of a defined volume of the formulation at room temperature (25 ± 1 °C). Phase separation was evaluated through visual inspection of samples stored under both ambient and elevated temperature conditions throughout the monitoring period.

2.3. Stability Analysis

The physicochemical stability of the formulation was evaluated over a three-month accelerated monitoring period under two storage temperature conditions: 25°C (ambient) and 40°C (elevated stress) [20, 21]. Samples were stored in amber glass dropper bottles, protected from direct sunlight, and evaluated at Week 1, Month 1, Month 2, and Month 3. At each time point, the following parameters were assessed: color, odor, physical appearance, density, packaging

integrity, phase separation, and microbiological growth. Density was determined gravimetrically at each evaluation interval. Color, odor, and appearance were assessed by trained observers under standardized conditions. Phase separation was evaluated through visual inspection of samples at both storage temperatures throughout the monitoring period. Packaging integrity was examined for leakage, deformation, or any visible deterioration. Microbiological growth was monitored at each time point by visual inspection for turbidity, surface pellicle formation, or any visible signs of contamination; samples exhibiting any such signs were additionally subjected to total aerobic mesophilic microorganism count determination in accordance with TS EN ISO 21149:2017.

2.4. Microbiological Analysis

Microbiological analysis was conducted in accordance with the guidelines of the Turkish Medicines and Medical Devices Agency (TİTCK) for cosmetic products [22]. Total aerobic mesophilic microorganism count was determined according to TS EN ISO 21149:2017. The absence of specified pathogenic microorganisms — *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 9027), *Escherichia coli* (ATCC 8739), and *Candida albicans* (ATCC 10231) — as well as yeast and mold counts were investigated using the relevant TS EN ISO reference standards [23]. It should be noted that the *Candida albicans* ATCC 10231 strain employed in this microbiological quality analysis is distinct from the NCPF 3179 strain utilized in the antimicrobial efficacy (challenge) test described in Section 2.5; the respective strains were selected in accordance with the requirements of the applicable reference standards for each test. The culture media and analytical methods employed for each microorganism are summarized in Table 2.

Table 2. Microbiological analysis methods and culture media

Microorganism	Method	Culture Media
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538	Enrichment & Streak Plating	Baird Parker Agar
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 9027	Enrichment & Streak Plating	Cetrimide Agar
<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739	Enrichment & Streak Plating	MacConkey Agar + Levine Eosin-Methylene Blue Agar
<i>Candida albicans</i> ATCC 10231	Enrichment & Streak Plating	Sabouraud 4% Dextrose Agar + Supplement
Yeast – Mold	Pour/Spread Plate	Sabouraud 4% Dextrose Agar + Supplement
Total Aerobic Mesophilic Microorganisms	Pour/Spread Plate	Tryptic Soy Agar with Polysorbate 80 and Lecithin

2.5. Antimicrobial Efficacy Testing (Challenge Test)

The adequacy of the preservative system was evaluated through antimicrobial efficacy testing conducted in accordance with TS EN ISO 11930:2019 and the guidelines of TITCK for cosmetic products [22, 24]. Five standard reference microorganisms were employed as test strains: *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 9027), *Escherichia coli* (ATCC 8739), *Candida albicans* (NCPF 3179), and *Aspergillus brasiliensis* (NCPF 2275). The *Candida albicans* NCPF 3179 strain was selected in compliance with TS EN ISO 11930:2019 requirements, and is therefore distinct from the ATCC 10231 strain employed in the microbiological quality analysis described in Section 2.4. Each formulation sample was inoculated with a standardized microbial suspension and stored under controlled conditions. Viable microbial counts were determined at Days 7, 14, and 28 post-inoculation, and logarithmic reductions relative to the initial inoculum were calculated for each strain. All tests were performed in triplicate. The culture media and incubation conditions applied for each microorganism are presented in Table 3.

Table 3. Antimicrobial analysis methods

Microorganism	Method	Culture Media	Incubation Condition
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538	Pour Plate	Tryptic Soy Agar	30 °C - 35 °C
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 9027	Pour Plate	Tryptic Soy Agar	30 °C - 35 °C
<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739	Pour Plate	Tryptic Soy Agar	30 °C - 35 °C
<i>Candida albicans</i> NCPF 3179	Pour Plate	Sabouraud 4% Dextrose Agar	30 °C - 35 °C
<i>Aspergillus brasiliensis</i> NCPF 2275	Pour Plate	Potato Dextrose Agar	30 °C - 35 °C

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Physicochemical Characterization

The developed hair care oil formulation presented as a clear, yellow, free-flowing liquid with a characteristic herbal aroma attributable to the rosemary essential oil component. The initial density of the formulation was determined as 0.910 g/mL. No phase separation was detected upon visual inspection at the initial time point, confirming the physical homogeneity of the single-phase anhydrous system. These organoleptic and physical characteristics are consistent with those reported for comparable multi-component botanical oil blends, where the absence

of aqueous phase eliminates interfacial instability and ensures a visually homogeneous product [20, 21].

3.2. Stability Analysis Results

The physicochemical stability of the formulation was monitored over a three-month period at both 25°C and 40°C. The results obtained at each evaluation time point are summarized in Table 4.

Table 4. Physicochemical stability results of the hair care oil formulation

Parameter	1 st Week	1 st Month	2 nd Month	3 rd Month
Color	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Odor	Characteristic	Characteristic	Characteristic	Characteristic
Appearance	Fluid liquid	Fluid liquid	Fluid liquid	Fluid liquid
Density (g/mL)	0.910	0.909	0.918	0.912
Packaging	Intact	Intact	Intact	Intact
Phase Separation	None	None	None	None
Microbiologic Growth	None	None	None	None

All parameters were evaluated under both storage conditions (25°C and 40°C). No differences in color, odor, appearance, phase separation, or microbiological growth were observed between the two temperature conditions at any time point. Density values represent the mean of measurements taken at both temperatures; the maximum deviation between conditions did not exceed 0.005 g/mL at any evaluation interval.

Throughout the entire monitoring period, no changes in color, odor, or physical appearance were detected at either storage temperature. Density values ranged between 0.909 and 0.918 g/mL across all time points and conditions, representing negligible variation. No phase separation was observed under any storage condition, and packaging integrity was maintained throughout the study.

The physicochemical resilience of the formulation under elevated temperature conditions is particularly significant, as accelerated stability testing at 40°C is widely employed in the cosmetic industry as a predictive tool for estimating real-time shelf-life performance [20, 21]. The observed stability may be largely attributed to the antioxidant synergy between tocopherol (vitamin E) and rosemary essential oil, both of which are recognized for their capacity to retard lipid peroxidation and protect unsaturated fatty acids from oxidative deterioration in oil-based cosmetic systems [18, 19]. Furthermore, the inherently anhydrous nature of the formulation eliminates hydrolytic degradation pathways that commonly compromise the stability of emulsion-based hair care products, contributing to its robust stability profile.

3.3. Microbiological Analysis Results

The results of the microbiological quality analysis are presented in Table 5.

Table 5. Microbiological analysis results of the hair care oil formulation

Microorganism	Result	Limit	Method	Compliance
Total Aerobic Mesophilic Microorganisms	<10 cfu/g	<1000 cfu/g	TS EN ISO 21149:2017	Compliant
Yeast and Mold	<10 cfu/g	<1000 cfu/g	TS EN ISO 16212:2017	Compliant
<i>Staphylococcus aureus</i>	Not detected	Absent	TS EN ISO 22718:2015	Compliant
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Not detected	Absent	TS EN ISO 22717:2015	Compliant
<i>Escherichia coli</i>	Not detected	Absent	TS EN ISO 21150:2015	Compliant
<i>Candida albicans</i>	Not detected	Absent	TS EN ISO 18416:2015	Compliant

Total aerobic mesophilic microorganism count and yeast-mold count were both determined to be below 10 cfu/g, well within the acceptable limit of <1000 cfu/g. None of the specified pathogenic microorganisms — *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, and *Candida albicans* — were detected in the formulation, confirming full compliance with the cosmetic microbiological safety guidelines established by TITCK [22].

These findings are consistent with the well-established principle that anhydrous oil-based systems inherently present an unfavorable environment for microbial proliferation due to the absence of free water, which is an essential prerequisite for the growth of most cosmetic contaminant microorganisms [23]. Nevertheless, the inclusion of Lexgard Natural as a naturally derived preservative system provided an additional layer of microbiological protection, reinforcing the overall safety profile of the formulation.

3.4. Antimicrobial Efficacy Test Results

The results of the challenge test conducted in accordance with TS EN ISO 11930:2019 are presented in Tables 6 and 7.

All five test microorganisms exhibited a progressive and substantial reduction in viable counts following inoculation. As defined in TS EN ISO 11930:2019, Criterion A requires a logarithmic reduction of ≥ 2 log for bacterial strains and ≥ 1 log for fungi (yeasts and molds) by Day 14, with no increase in viable counts through Day 28. For the three bacterial strains (*S. aureus*, *P.*

aeruginosa, E. coli) and C. albicans, viable counts dropped below the detection limit (<10 cfu/g) by Day 7 and remained at this level through Day 28. For A. brasiliensis, counts reached below the detection limit by Day 14 and were maintained through Day 28. Logarithmic reductions for bacterial strains ranged from 3.48 to 4.65 log at Day 7, maintained through Day 28. Candida albicans achieved a 3.60 log reduction by Day 7, while Aspergillus brasiliensis reached a 4.20 log reduction by Day 14, both with no increase in viable counts thereafter. These results confirm that the formulation met Criterion A as defined in TS EN ISO 11930:2019 for all five test microorganisms.

Table 6. Viable microbial counts (cfu/g) at each sampling time point

Microorganism	Day 0 - N (cfu/g)	Day 0 - N ₀ (cfu/g)	Day 7 - N ₇ (cfu/g)	Day 14 - N ₁₄ (cfu/g)	Day 28 - N ₂₈ (cfu/g)
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538	1.9×10 ⁸	4.5×10 ⁵	<10	<10	<10
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 9027	1.1×10 ⁸	1.2×10 ⁵	<10	<10	<10
<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739	1.7×10 ⁸	3.0×10 ⁴	<10	<10	<10
<i>Candida albicans</i> NCPF 3179	2.0×10 ⁶	4.0×10 ⁴	<10	<10	<10
<i>Aspergillus brasiliensis</i> NCPF 2275	1.0×10 ⁶	1.6×10 ⁵	NA	<10	<10

Table 7. Logarithmic reductions at each sampling time point

Microorganism	N ₀ (log)	N ₇ (log)	Log Reduction Day 7	N ₁₄ (log)	Log Reduction Day 14	N ₂₈ (log)	Log Reduction Day 28
<i>Staphylococcus aureus</i>	5.65	1.00	4.65	1.00	4.65	1.00	4.65
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5.08	1.00	4.08	1.00	4.08	1.00	4.08
<i>Escherichia coli</i>	4.48	1.00	3.48	1.00	3.48	1.00	3.48
<i>Candida albicans</i>	4.60	1.00	3.60	1.00	3.60	1.00	3.60

<i>Aspergillus brasiliensis</i>	5.20	NA	-	1.00	4.20	1.00	4.20
---------------------------------	------	----	---	------	------	------	------

These findings are in line with the known antimicrobial mechanisms of glyceryl ester-based natural preservatives, which act primarily through disruption of microbial cell membrane integrity and are particularly effective against gram-positive bacteria and yeasts under mildly acidic conditions [11]. The achievement of Criterion A across all five test organisms underscores the efficacy of the Lexgard Natural preservative system as a clean-label alternative to conventional synthetic preservatives such as parabens and formaldehyde-releasing agents, which are facing increasing regulatory scrutiny and consumer rejection in the global cosmetics market [2].

REFERENCES

- [1] The Business Research Company, Natural Hair Care Products Global Market Report, The Business Research Company, London, 2024.
- [2] Emergen Research, Hair Oils Market — Industry Analysis and Forecast to 2034, Emergen Research, Vancouver, 2024.
- [3] Gavazzoni, D. and Reis, M.F., Hair Cosmetics: An Overview, International Journal of Trichology, 7(1), 2-15, 2015.
- [4] Ju-Sub, K. and Ji-Sun, M., Effects of Apricot Kernel Oil on the Improvement Hair Texture, Journal of Korean Applied Science and Technology, 38(3), 700-707, 2021.
- [5] Fratianni, F., d’Acerno, A., Ombra, M.N., Amato, G., De Feo, V., Ayala-Zavala, J.F., Coppola, R., and Nazzaro, F., Fatty Acid Composition, Antioxidant, and *In Vitro* Anti-inflammatory Activity of Five Cold-Pressed Prunus Seed Oils, and Their Anti-biofilm Effect Against Pathogenic Bacteria, Frontiers in Nutrition, 8, 775751, 2021.
- [6] Gharby, S. and Charrouf, Z., Argan Oil: Chemical Composition, Extraction Process, and Quality Control, Frontiers in Nutrition, 8, 804587, 2022.
- [7] Faria, P.M., Camargo, L.N., Carvalho, R.S.H., Paludetti, L.A., Velasco, M.V.R. and Gama, R.M., Hair Protective Effect of Argan Oil (*Argania spinosa* Kernel Oil) and Cupuassu Butter (*Theobroma grandiflorum* Seed Butter) Post Treatment with Hair Dye, Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications, 3, 40-44, 2013.
- [8] Gad, H.A., Roberts, A., Hamzi, S.H., Gad, H.A., Touiss, I., Altyar, A.E., Kensara, O.A. and Ashour, M.L., Jojoba Oil: An Updated Comprehensive Review on Chemistry, Pharmaceutical Uses, and Toxicity, Polymers (Basel), 13(11), 1711, 2021.

- [9] Levent, O., A Detailed Comparative Study on Some Physicochemical Properties, Volatile Composition, Fatty Acid, and Mineral Profile of Different Almond (*Prunus dulcis* L.) Varieties, *Horticulturae*, 8, 488-501, 2022.
- [10] Tzu-Kai, L, Zhong, L. and Santiago, J.L., Anti-Inflammatory and Skin Barrier Repair Effects of Topical Application of Some Plant Oils, *International Journal of Molecular Sciences*, 19(1), 70-90, 2018.
- [11] Girdler, K., Cabatu, A., Olds, H. and Potts, G.A., Use of Castor Oil in Dermatology: A Narrative Review, *Cureus*, 18(2), e103289, 2026.
- [12] Pappas, A., Epidermal Surface Lipids, *Dermato-Endocrinology*, 1(2), 72–76, 2009.
- [13] Fiume, M.M., Heldreth, B.A., Bergfeld, W.F., Belsito, D.V., Hill, R.A., Klaassen, C.D., Liebler, D.C., Marks, J.G., Shank, R.C., Slaga, T.J., Snyder, P.W. and Andersen, F.A., Safety Assessment of Alkyl Esters as Used in Cosmetics, *International Journal of Toxicology*, 34(S2), 5S–69S, 2015.
- [14] Cárdenas, D.M., Gómez Rave, L.J. and Soto, J.A., Biological Activity of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo) and Potential Uses in Human Health: A Review, *Food Technology and Biotechnology*, 59(3), 253–266, 2021.
- [15] Wang, S., Zhu, F. and Kakuda, Y., Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional Composition, Biological Activity, and Uses, *Food Chemistry*, 265, 316–328, 2018.
- [16] Pittler, M.H. and Ernst, E., Horse Chestnut Seed Extract for Chronic Venous Insufficiency, *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 1(11), 1-41, 2012.
- [17] Bombardelli, E., Morazzoni, P. and Griffini, A., *Aesculus hippocastanum* L., *Fitoterapia*, 67(6), 483–511, 1996.
- [18] Panahi, Y., Taghizadeh, M., Marzony, E.T. and Sahebkar, A., Rosemary Oil vs Minoxidil 2% for the Treatment of Androgenetic Alopecia: A Randomized Comparative Trial, *SKINmed*, 13(1), 15–21, 2015.
- [19] Keen, M.A. and Hassan, I., Vitamin E in Dermatology, *Indian Dermatology Online Journal*, 7(4), 311–315, 2016.
- [20] Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu (TİTCK), Etkin Maddelerin ve Bitmiş Ürünlerin Stabilite Testlerine İlişkin Kılavuz, TİTCK, Ankara, 2017.
- [21] International Council for Harmonisation, ICH, Guideline: Stability Testing of New Drug Substances and Products Q1A(R2), 2003.
- [22] Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu (TİTCK), Kozmetik Ürünlerin Mikrobiyolojik Kontrolüne İlişkin Kılavuz, Sürüm 1.0, TİTCK, Ankara, 2005.

- [23] Orth, D.S., Kabara, J.J., Denyer, S.P. and Tan, S.K., *Cosmetic and Drug Microbiology*, Informa Healthcare, New York, 2006.
- [24] TS EN ISO 11930:2019, *Kozmetikler — Kozmetik Ürünlerin Mikrobiyolojik Kontrolü — Kozmetik Ürünlerin Antimikrobiyal Korumasının Değerlendirilmesi*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [25] Crowther, J.M., *Skin Barrier Enhancing Alternative Preservation Strategy of O/W Emulsions by Water Activity Reduction with Natural Multifunctional Ingredients*, *Cosmetics*, 9(3), 53-65, 2022.
- [26] Tang, Z. and Du, Q., *Mechanism of Action of Preservatives in Cosmetics*, *Journal of Dermatologic Science and Cosmetic Technology*, 1(4), 100054, 2024.
- [27] Hyldgaard, M., Sutherland, D.S., Sundh, M., Mygind, T. and Meyer, R.L., *Antimicrobial Mechanism of Monocaprylate*, *Applied and Environmental Microbiology*, 78(8), 2957–2965, 2012.
- [28] Nowak, K., Jabłońska, E. and Ratajczak-Wrona, W., *Controversy Around Parabens: Alternative Strategies for Preservative Use in Cosmetics and Personal Care Products*, *Environmental Research*, 198, 110488, 2021.

***FUSARIUM GRAMINEARUM*'A KARŞI ÇEŞİTLİ ANTİFUNGALLERİN *İN VİTRO* ETKİNLİK DEĞERLENDİRMESİ**

Araştırma Görevlisi, Özlem SEFER

İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, ozlem.sefer@yeniyyuzyil.edu.tr - 0000-0002-2711-5938

Profesör Doktor, Sevgi MARAKLI

Yıldız Teknik Üniversitesi, smarakli@yildiz.edu.tr - 0000-0001-5796-7819

ÖZET

Fusarium graminearum, tahıllar ve diğer tarım ürünlerinde *Fusarium* baş yanıklığı ve kök/kök boğazı çürüklüğü hastalıklarının başlıca etmeni olarak ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada, etki mekanizması bilinmeyen dodine zirai ilacının kullanım etkinliğinin, etki mekanizması bilinen referans antifungallerle karşılaştırarak *in vitro* etkinlik değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada; tebukonazol (0,5-4 µg/ml), tiyofonatmetil (1-16 µg/ml), dodine (60-300 µg/ml) ve azoksistrobin (100-800 µg/mL) antifungal kimyasallarının farklı konsantrasyonlarının *F. graminearum* PH-1 suşu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Uygulamalar 3 teknik ve 3 biyolojik tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş, ve radyal misel büyümesi 4. ve 7. günde ölçülerek % lineer büyüme oranı analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kontrol grubu ile karşılaştırıldığında tebukonazol uygulamasının 1,5 µg/mL konsantrasyonda misel gelişimini %67,45 ($p<0,0001$), 0,5 µg/mL konsantrasyonda ise %35,29 ($p<0,0001$) oranında baskıladığı belirlenmiştir. Tebukonazolün EC₅₀ değeri, 0,94 µg/mL olarak hesaplanmıştır. Tiyofanat-metil uygulamasının 8 µg/mL konsantrasyonda misel gelişimini %81,56 ($p<0,0001$), 2 µg/mL konsantrasyonda ise %20,00 ($p<0,0001$) oranında baskıladığı tespit edilmiş olup, EC₅₀ değeri 4,82 µg/mL olarak belirlenmiştir. Azoksistrobin uygulamasında ise 800 µg/mL konsantrasyonda %70,19 ($p<0,0001$), 100 µg/mL konsantrasyonda %29,80 ($p<0,0001$) oranında gelişim baskılanmış ve EC₅₀ değeri 566,42 µg/mL olarak hesaplanmıştır. Dodine uygulamasında ise 300 µg/mL konsantrasyonda %69,25 ($p<0,0001$), 60 µg/mL konsantrasyonda %14,28 ($p<0,0005$) oranında baskılama belirlenirken, EC₅₀ değeri 286 µg/mL olarak tespit edilmiştir. EC₅₀ değerleri arasındaki belirgin farklılıklar, fungusitlerin etkinlik düzeylerinin geniş bir aralıkta değiştiğini ve tarla uygulamalarında kullanılacak fungusitlerin seçiminde bu *in vitro* sonuçların yol gösterici olabileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, antifungal kimyasalların doğru ve seçici kullanımına, direnç yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine ve yeni fungusitlerin geliştirilmesine yönelik önemli ön bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Fusarium graminearum*, Dodine, *in vitro* etkinlik, EC₅₀

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2025-7046 numaralı proje ve TÜBİTAK 1002-A Hızlı Destek Modülü kapsamında 225O353 numaralı proje ile desteklenmiştir.

**PLEUROTUS A VE PLEUROTUS B MEMBRAN SALDIRI
KOMPLEKSİ/PERFORİN-BENZERİ PROTEİNLERİNİN MOLEKÜLER
KLONLANMASI**

MSc. Kübra ERGÜN

Yıldız Teknik Üniversitesi, kubra.ergun@std.yildiz.edu.tr - 0000-0002-8479-8317

Araş. Gör. Dr. Merve YILMAZER

İstanbul Üniversitesi, merve.yilmazer@istanbul.edu.tr - 0000-0003-4382-3763

Prof. Dr. Sevgi MARAKLI

Yıldız Teknik Üniversitesi, smarakli@yildiz.edu.tr - 0000-0001-5796-7819

ÖZET

Membran saldırı kompleksi/perforin-benzeri (MACPF) proteinleri, hedef hücrelerin zarında silindirik porlar oluşturarak zar bütünlüğünü bozan por oluşturan proteinler ailesidir. MACPF kompleman proteinleri tarafından oluşturulan porlar, hücresel iyon dengesini ve homeostazı bozarak hücre ölümüne yol açar. Bu proteinler; bakteriler, mantarlar ve hayvanlar arasında yaygın olarak bulunur. *Pleurotus ostreatus*'ta Pleurotus A (PlyA) ve Pleurotus B (PlyB) proteinleri tanımlanmış olmasına karşın bu alanda yapılan çalışmaların sayısı azdır. Bu projenin amacı, *PlyA* ve *PlyB* genlerinin model bir organizma olan *Schizosaccharomyces pombe* mayasına klonlanmasıdır. Bu amaçla, *plyA* ve *plyB* genleri öncelikle pSGP572 anlatım vektörüne klonlanmıştır. Rekombinant plazmitler *E. coli*'de çoğaltılmış, elde edilen koloniler PCR ve DNA dizileme analizleri ile doğrulanmıştır. Daha sonra rekombinant plazmitler, lityum asetat yöntemi kullanılarak *Schizosaccharomyces pombe* mayasına transforme edilmiştir. Elde edilen transformantlar, koloni PCR ve DNA dizileme analizleri ile doğrulanmıştır. Bu çalışma, *Pleurotus ostreatus* kaynaklı MACPF proteinlerinin ökaryotik bir anlatım sisteminde üretilmesine yönelik önemli bir adım olup, gelecekte bu proteinlerin fonksiyonel özellikleri ve biyolojik aktivitelerinin araştırılmasına temel oluşturacaktır.

Keyword: Gen klonlama, *MACPF*, *PlyA*, *PlyB*, *Schizosaccharomyces pombe*

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2024-6498 numaralı proje ile desteklenmiştir.

MAVİ KANTARON'DAN ELDE EDİLEN FRAKSİYONLARIN FİTOKİMYASAL VE SİTOGENETİK ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

Msc. Dilara DÖRTER

Yıldız Teknik Üniversitesi, dilara.dorter@std.yildiz.edu.tr - 0000-0001-5783-3570

Prof. Dr. Sevgi MARAKLI

Yıldız Teknik Üniversitesi, smarakli@yildiz.edu.tr - 0000-0001-5796-7819

ÖZET

Bitki ekstraktlarının eldesi için seçilen çözücünün polaritesi, elde edilen ekstraktın fitokimyasal içeriğinde belirgin farklılıklara yol açmaktadır. Bu çalışmanın amacı, farklı polariteye sahip çözücüler kullanılarak elde edilen ekstraktların biyokimyasal (toplam fenolik ve flavonoid içerikleri) ve metabolomik (HPLC) açıdan analiz edilmesi ile bu ekstraktların kolon kanseri hücre hattındaki sitotoksik aktivitelerinin belirlenmesidir. Bu amaçla, etanol (ET), etil asetat (EA) ve heksan (HX) çözücülerini kullanılarak elde edilen fraksiyonların toplam fenolik ve flavonoid içerikleri karşılaştırılmıştır. Flavonoid ve toplam fenolik bileşik içerikleri değerlendirildiğinde, orta polariteye sahip EA fraksiyonunun sırasıyla 7,548 mg QE/g ve 42,49 mg GAE/g değerleriyle en yüksek içeriğe sahip olduğu belirlenmiştir. HPLC analizlerinde apigeninin tüm fraksiyonlarda baskın bileşik olduğu saptanmıştır (ET: 4,098; EA: 1,611; HX: 1,284 µg/mg). Fraksiyonların sitotoksik aktivitelerini değerlendirmek için HT29 kolon kanseri hücre hattına 10–11000 µg/mL konsantrasyon aralığında 24 ve 48 saat süreyle MTT testi uygulanmıştır. Kırk sekiz saat sonunda IC₅₀ değerleri ET, EA ve HX fraksiyonları için sırasıyla 4902, 14359 ve 4061 µg/mL olarak belirlenmiştir. Yirmi dört saat sonunda ise yalnızca ET ve HX fraksiyonları için IC₅₀ değerine (10262 ve 8215 µg/mL) ulaşılmıştır. Two-way ANOVA ve Dunnett testine göre ET, EA ve HX fraksiyonları, HT29 hücre canlılığını kontrol grubuna kıyasla anlamlı düzeyde azaltmıştır ($p < 0,0001$). Elde edilen bulgular, çözücü polaritesinin fitokimyasal kompozisyon ve sitotoksik etki üzerinde belirleyici olduğunu, aynı bitki kaynağından elde edilen fraksiyonların ise fitokimyasal içerik ve biyolojik aktivite bakımından belirgin farklılıklar gösterebildiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Centaure cyanus*, fraksiyonlama, kolon kanseri, HPLC

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından TDK-2025-7258 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

EQUISETUM ARVENSE BİTKİSİNDE TANIMLANAN MİRNA'LARIN İNSAN GENOMUNDAKİ POTANSİYEL HEDEF GENLERİNİN BİYOİNFORMATİK ANALİZİ

MSc. Esra Nur GÜLTEKİN

Yıldız Teknik Üniversitesi, esra.gultekin@std.yildiz.edu.tr, 0000-0002-9110-8433

Prof. Dr. Sevgi MARAKLI

Yıldız Teknik Üniversitesi, smarakli@yildiz.edu.tr, 0000-0001-5796-7819

ÖZET

Bitki kaynaklı mikroRNA'ların (miRNA), türler arası gen düzenlenmesinde rol oynayabileceği yönündeki bulgular, son yıllarda biyoinformatik ve moleküler biyoloji alanında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu bağlamda, bitki miRNA'larının insan genomundaki potansiyel hedef genlerinin belirlenmesi, olası biyolojik etkilerin ve moleküler mekanizmaların aydınlatılması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, mirBase ve NCBI veri tabanları kullanılarak *Equisetum arvense* bitkisinde tanımlanan miRNA'ların insan genomundaki potansiyel hedef genlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, *Equisetum arvense*'ye ait belirlenen dört miRNA dizisinin RNAfold ile sekonder yapıları çizilmiştir. Sonrasında olgun miRNA dizileri, psRNATarget ve miRanda programlarına yüklenerek insandaki potansiyel hedef genleri belirlenmiştir. Analizler sonucunda, *Equisetum arvense* kaynaklı dört miRNA'nın insan genomunda toplam 12 potansiyel geni hedeflediği belirlenmiştir. Literatür incelemesine ile bu genlerin apoptoz, embriyogenez, hücre yenilenmesi, DNA onarımı, kromatin modifikasyonu, glikoz/insülin homeostazı, hücresel taşıma süreçleri, nöron morfogenez ve fosfolipit biyosentezi gibi çeşitli biyolojik süreçlerde rol aldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, *Equisetum arvense* kaynaklı miRNA'lar ile insan genleri arasındaki olası etkileşimleri araştırmak için biyoinformatik bir çerçeve sunmaktadır. Bitki kaynaklı miRNA'ların türler arası gen düzenlenmesindeki potansiyel rollerinin ortaya konulması, bitki-insan moleküler etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacak ve bu alandaki deneysel araştırmaların geliştirilmesine temel oluşturacaktır.

Anahtar Kelimeler: Epigenetik, gen anlatımının düzenlenmesi, cross-kingdom, *in silico*

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2024-6511 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

GÖLLER YÖRESİNDE TOROS GÖKNARININ (*Abies Cilicica*) İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ALTINDA GÜNÜMÜZ VE GELECEKTEKİ POTANSİYEL DAĞILIMI

Dr. Seda KAYA KÖSE

Bağımsız Araştırmacı, s.kaya1990@gmail.com - 0000-0003-1418-5360

ÖZET

İklim değişimleri, bitki taksonlarının dağılım alanlarını etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle belirli ekolojik koşullara gereksinim duyan ağaç türlerinin gelecekteki dağılımlarının belirlenmesi, koruma ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için önemlidir. Bu çalışmada *Abies cilicica* (Antoine & Kotschy) Carrière) (Toros Göknarı)'nın Türkiye'nin önemli bitki çeşitliliği alanlarından biri olan Göller Yöresindeki günümüz ve gelecek iklim koşulları altındaki potansiyel dağılım alanlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Araştırmada, bitki türünün mevcut ve gelecekteki potansiyel coğrafi dağılımını belirlemek amacıyla varlık verileri (presence-only) ile günümüz ve gelecek iklim verileri kullanılarak Maksimum Entropi (MaxEnt) algoritmasına dayalı tür dağılım modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bitki taksonunun lokasyon verileri arazi çalışmaları, literatür kaynakları, herbaryum kayıtları ve çevrimiçi veri tabanlarından elde edilmiştir. Modelleme sürecinde CHELSA veri tabanından elde edilen günümüz ve gelecek biyoiklim (2040-2070-2100) değişkenleri kullanılmıştır. Değişkenler arasındaki çoklu bağlantı problemini ortadan kaldırmak amacıyla korelasyon ve faktör analizleri uygulanmıştır. Modelin başarı performansı, AUC ve TSS metrikleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, MaxEnt modeli AUC=0,941 değeri ile yüksek bir tahmin gücü sergilemiştir. Toros göknarının Göller Yöresindeki potansiyel dağılımını sınırlayan en önemli çevresel değişkenlerin Bio1, Bio4, Bio12, Bio15 (Bio1: Yıllık ortalama sıcaklık, Bio4: Sıcaklık Mevsimselliği, Bio12: Yıllık Yağış Miktarı ve Bio15: Yağışın Mevsimselliği) olduğu tespit edilip modelleme sürecine dahil edilmiştir. Model sonuçları, Toros göknarı için ekolojik olarak uygun alanların yörenin güney kesimlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Gelecek iklim senaryolarında ise tür için uygun habitat alanlarının önemli ölçüde daralabileceği öngörülmektedir. Elde edilen bulgular, Toros Göknarı'nın iklim değişkenliğine karşı hassas bir tür olduğunu ortaya koymakta ve türün korunmasına yönelik planlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler : *Abies cilicica*, MaxEnt, Tür Dağılım Modellemesi, Göller Yöresi, İklim değişikliği

ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE MİKROPLASTİKLERİN AKİBETİ VE ÇEVRESEL RİSKLERİ

Prof. Dr. Senar AYDIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, sozcan@erbakan.edu.tr - 0000-0002-0960-480X

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, meaydin@erbakan.edu.tr - 0000-0001-6665-198X

ÖZET

Günümüzün en önemli küresel çevre sorunlarından olan mikroplastikler (MP) düşük yoğunlukları ve küçük partikül boyutları (<5 mm) nedeniyle kanalizasyon sistemleri aracılığıyla atıksu arıtma tesislerine (AAT) ulaşmaktadır. Akuatik ve karasal ortamlarda AAT'ler önemli bir MP kirliliği kaynağı olarak değerlendirilmektedir. AAT'lerde MP giderim verimi kullanılan teknolojiye bağlı olarak yaklaşık %60 ile %99,9 arasında değişmektedir. Giderim verimi AAT teknoloji ve koşullarının yanı sıra MP'nin partikül boyutu, şekli ve polimer türüne de bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca MP'ler AAT bünyesinde fizikokimyasal değişimlere uğramakta, nanoplastik oluşumu AAT'deki giderimi daha da güçleştirmekte ve bozunma ürünlerinin ekotoksitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. AAT'de atıksu içerisinde uzaklaştırılan MP'ler biyolojik arıtma süreçlerinde arıtma çamurunda birikmekte ve biyokatı tarım arazilerine uygulandığında bu kirleticiler karasal ekosistemlere taşınmaktadır. MP'ler plastikleştiriciler, boyalar, dolgu maddeleri ve stabilizatörler gibi çeşitli katkı kimyasallarının eklenmesiyle üretilmekte; çevreye salındığında ise hidrofobik organik kirleticiler, eser metaller ve ilaçlar gibi kimyasal kontaminantları yüzeylerine adsorbe etmektedir. Bu maddelerin sindirim sistemiyle olan etkileşimi, hem içsel katkıların hem de adsorbe edilmiş dış kirleticilerin biyoyararlanımını ve toksitesini artırabilmektedir. AAT'lerdeki MP'ler, hem nokta kaynaklı su kirliliği hem de biyokatı kökenli karasal kirlilik açısından çift yönlü bir çevresel tehdit oluşturmaktadır. Avrupa Birliği, AAT'leri MP kirliliğinin önemli bir kaynağı olarak kabul etmiş ve bu sorunu 2024 Kentsel Atıksu Yönetimi Politikası'na dahil ederek ileri arıtım kademesini zorunlu kabul etmiştir. Mevcut konvansiyonel arıtma teknolojileri, özellikle nanoplastikler ve MP'lerin tam giderim sağlama konusunda yetersiz kalmakta; bu durum hem ileri arıtma teknolojilerine hem de standartlaştırılmış izleme yaklaşımlarına acil ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atıksu arıtma tesisi, mikroplastik, giderim, ekotoksikolojik risk.

1. GİRİŞ

Gündelik yaşamın her alanında yaygın kullanımları nedeniyle plastik üretimi 1950'li yıllardan bu yana katlanarak artmış ve küresel yıllık üretim miktarı 400 milyon tonu aşmıştır [1]. Ancak üretilen plastik atıkların yalnızca sınırlı bir kısmı geri dönüştürülmektedir. Uygun olmayan bertaraf yöntemleri nedeniyle plastik atıklar zamanla mekanik aşınma, ultraviyole (UV)

radyasyon, sıcaklık değişimleri ve mikrobiyal aktivite gibi etkenlerle parçalanarak mikroplastiklere (MP) dönüşmektedir. 5 mm'den küçük plastik parçalar olarak tanımlanan MP'ler günümüzde hava, su ve toprak gibi ortamlarda yaygın şekilde tespit edilmektedir. MP'ler atıksuya farklı yollarla ulaşabilirler. Çamaşır yıkama sürecinde tekstil ürünlerinden salınan mikrofiberler, kişisel bakım ürünlerinden kaynaklı mikrobuncuklar, endüstriyel plastik işleme tesisleri, boya ve kaplama malzemeleri ve lastik aşınma parçacıkları atıksudaki başlıca MP kaynakları olarak sıralanabilir.

Kentsel atıksu arıtma tesisleri (AAT) konvansiyonel arıtma prosesleri içermekte olup MP giderimi için tasarlanmamıştır. Bu nedenle MP'ler birincil, ikincil ve üçüncül arıtma proseslerinden geçerken kısmi olarak giderimi sağlanmaktadır. Atıksudan tam olarak giderilmeyen MP'ler atıksu deşarjları yoluyla yüzeysel su kaynaklarına ulaşmaktadır. Arıtma sürecinde atıksudan ayrılan MP'ler artıma çamurunda birikmekte olup stabilize çamurun tarım arazilerine biyokatı olarak uygulanması sonucu karasal ekosistemlere MP taşınımına neden olmaktadır [1,2].

MP'ler fiziksel bir kirleticisi olmanın yanı sıra üretimlerinde kullanılan plastikleştiriciler, alev geciktiriciler, stabilizatörler gibi katkı kimyasalları içerirler. Ayrıca geniş yüzey alanları nedeniyle yüzeylerine ağır metaller, kalıcı organik kirleticiler gibi pekçok kirleticiyi adsorbe ederek ekosistem içerisinde vektör görevi görürler. Çevresel risk açısından değerlendirildiğinde canlı organizmalar tarafından MP'lerin alınması hem fiziksel etkilerinin hem de taşıdıkları kimyasal kirleticilerin biyoyararlanımını artırarak toksisiteyi güçlendirebilmektedir. Ayrıca MP'ler arıtma tesisinde mekanik ve kimyasal arıtma süreçlerinde 1 µm'den daha küçük plastik parçacıklara yani nanoplastiklere (NP) dönüşebilmektedir. Bu durum arıtma tesisinde hem giderim verimini düşürmekte hem de oluşan parçacıkların ekotoksikolojik etkilerini değiştirebilmektedir. Ayrıca MP'lerin AAT işletme parametreleri (çamur bekletme süresi, hidrolik bekletme süresi, havalandırma yoğunluğu gibi) üzerindeki olası olumsuz etkileri de tesis işletmecileri açısından yeni bir operasyonel risk kaynağı oluşturmaktadır.

Avrupa Birliği atıksudaki yeni ortaya çıkan kirleticiler olarak değerlendirilen MP ve diğer mikrokirleticileri (farmasötik, kosmetik gibi) de dikkate alarak Kasım 2024'te yürürlüğe giren 2024/3019 sayılı Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi ile 150 000 eşdeğer nüfus sahibi ve üzeri tesislerde kademeli olarak dördüncül arıtım yükümlülüğü getirmiştir [3,4]. Bu durum MP'lerin sadece bilimsel araştırmalar ile sınırlı kalmadığını atıksu yönetiminde düzenlemeler boyutunda da ele alındığını göstermektedir. Ancak ülkemizde AAT'lerde MP varlığı, akıbeti ve giderim performansına ilişkin çalışmalar henüz sınırlı düzeydedir [5]. Bu nedenle çalışma kapsamında MP'lerin atıksuya girişi, AAT'lerde akıbetini ve giderimi, arıtma çamuru yoluyla karasal ekosisteme taşınımını, çevresel ortamlardaki ekotoksikolojik riskleri değerlendirilmiştir. Düzenleyici/teknolojik çözüm yaklaşımlarını ve öneriler sunulmuştur.

2. ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE MİKROPLASTİKLERİN KAYNAKLARI VE AKİBETİ

2.1. Mikroplastiklerin Atıksuya Giriş Yolları

Kentsel atıksuya giren MP'lerin en önemli kaynağı çamaşır yıkama faaliyetleri sonucunda oluşan atıksulardır. Polyester, naylon ve akrilik gibi sentetik malzemelerden üretilen kıyafetler çamaşır makinesinde yıkanma sürecinde çok fazla sayıda fiber oluşmaktadır. Napper ve Thompson [6] tarafından yürütülen laboratuvar çalışmasında farklı kumaş türleri ve yıkama koşullarının fiber salınımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sentetik kumaşların yıkama koşullarına bağlı olarak değişken miktarlarda fiber saldığı ve bu fiberlerin atıksu ile kanalizasyon sistemine ulaştığı ortaya konmuştur. Bir yıkama döngüsünde tek bir giysiden 1900'den fazla fiber salınabildiği rapor edilmiştir. Tekstil endüstrisinin küresel atıksudaki MP kirliliğine katkısının %49-70 aralığında olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle gerçekleştirilen çalışmalarda AAT'nin giriş ve çıkışında en sık gözlenen MP şekli fiber olarak kaydedilmektedir [1].

Kişisel bakım ürünlerinden kaynaklanan MP'ler de atıksudaki önemli bir birincil MP kaynağıdır. Yüz temizleyiciler, peeling ürünleri, diş macunu ve bazı kozmetiklerde yer alan mikroboncuklar kullanım sonrasında doğrudan lavabo ve tuvalet yoluyla kanalizasyona ulaşmaktadır. Ayrıca ev temizlik kimyasalları, boyalar ve kaplama malzemeleri poliakrilat, polistiren, poliüretan ve epoksi reçineleri gibi sentetik polimerler içermektedir. Bu malzemelerin uygulama, sökme veya aşınma süreçleri MP salınımına yol açabilmektedir [1]. Ayrıca lastik aşınması yoluyla oluşan ve kentsel yüzey akışı yoluyla taşınan MP'ler birleşik kanalizasyon sistemleri ile AAT'lere ulaşmaktadır. Plastik üretim ve işleme tesisleri, tekstil üretimi, inşaat malzemeleri üretimi, sondaj sıvıları ve endüstriyel aşındırıcılarda kullanılan polimer bazlı malzemelerin uygun olmayan bertarafı, önemli miktarda MP'nin doğrudan atıksuya karışmasına neden olabilmektedir [1].

Atıksuya giren MP konsantrasyonları dünya genelinde çok geniş bir aralıkta değişkenlik göstermektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda atıksudaki MP konsantrasyonunun değişken olduğu gözlenmektedir. Bodzek ve ark. [1] tarafından gerçekleştirilen derleme çalışma kapsamında MP konsantrasyonlarının AAT giriş atıksuyunda 1 ila 10.044 MP/L arasında, AAT çıkış atıksuyunda ise 0 ila 447 MP/L arasında değiştiği rapor edilmiştir. Liu ve ark. [2] tarafından 11 ülkede 38 AAT'nin incelendiği başka bir çalışmada ise AAT giriş atıksuyunda 0,28 ila $3,14 \times 10^4$ MP/L, çıkış atıksuyunda ise 0,01 ila $2,97 \times 10^2$ MP/L arasında olduğu rapor edilmiştir. Konsantrasyon değişimi AAT'nin hizmet verdiği nüfusun büyüklüğüne, atıksu kaynağının niteliğine (evsel, endüstriyel gibi), yaşam tarzı ve atık bertaraf yöntemleri gibi pek çok faktöre bağlıdır. Ayrıca atıksu numunesi alma, ön işlem ve MP analiz yöntemleri de tespit edilen MP konsantrasyonunu etkilemektedir [1,2].

Morfolojik açıdan değerlendirildiğinde fiber, fragment ve filmler en sık tespit edilen MP şekilleridir. Literatürde fiberlerin yaklaşık %60 oranında olduğu ve bunun temel nedeninin evsel çamaşır yıkama deşarjları olduğu bildirilmiştir [2]. Polimer türü bakımından ise polietilen (PE), polipropilen (PP), poliamid (PA), polyester (PES), polistiren (PS) ve polietilen tereftalat (PET) atıksularda en sık rastlanan polimer gruplarıdır. MP boyutu AAT'de giderim verimini belirleyen ayrıca ekolojik risk potansiyelini değiştiren kritik bir parametredir. Literatürde yer alan çalışmalarda atıksudaki MP'lerin yaklaşık %90'ının 500 μm 'den küçük olduğu, bazı çalışmalarda ise MP'lerin yaklaşık %60'ının 100 μm 'den küçük olduğu rapor edilmiştir [1].

Küçük boyutlu parçacıkların canlılar tarafından daha kolay alınabilmesi ve hücrel bariyerleri geçme potansiyeli taşıması ekotoksikolojik açıdan öncelikli olarak değerlendirilmelidir.

AAT'lerde rapor edilen MP miktarı, türü, boyutu gibi değişkenlikler nedeniyle tek bir tesisten elde edilen verilerin ulusal ölçekte genelleştirilebilmesine imkan sunmadığından farklı büyüklük, teknoloji ve coğrafi konuma sahip tesislerin MP kirliliğinin izlenmesini gerektirmektedir. Ayrıca kaynaktan önleme yaklaşımı ile en önemli MP kaynağı olan çamaşır makinesi çıkışlarına filtre takılması, kozmetik ürünlerinde MP kullanımının sınırlandırılması gibi uygulamaların yanısıra arıtma tesislerinin MP giderimini sağlayacak şekilde modifiye edilmesi gereklidir.

2.2. Atıksu Arıtma Tesislerinde Giderim Mekanizmaları ve Giderim Verimleri

Konvansiyonel AAT'ler MP giderimi için özel olarak tasarlanmamış olmasına rağmen fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma süreçlerinde kısmen MP giderimi gerçekleşmektedir. Birincil arıtma kademesi olan ızgara, kum tutucu ve ön çöktürme havuzlarında büyük boyutlu ve yoğunluğu suyunkinden fazla olan MP'ler yerçekimi çökeltme etkisiyle sudan %16,5 ile %98,4 arasında değişen oranlarda giderilebilmiştir [1]. Koagülasyon-flokülasyon işlemi MP'lerin flok yapılarıyla agregasyonunu sağlayarak MP giderim verimini artırmaktadır [2]. Çözünmüş hava flotasyonu (DAF) sistemleri ise özellikle düşük ve orta yoğunluklu MP'lerin (PE, PP, PS, PA gibi) hava kabarcıklarına tutunarak yüzeye taşınması ve köpük tabakası halinde yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. DAF sistemlerinin kullanıldığı bazı tesislerde %95'e varan MP giderim verimleri rapor edilmiştir [1,7]. İkincil arıtma kademesinde, aktif çamur, biyofiltreler, membran biyoreaktörler (MBR) ve doğal arıtma sistemleri (yapay sulak alanlar) kullanılmaktadır. Aktif çamur sisteminde MP giderimi çamur floklarının içerisindeki MP'lerin ikincil çöktürme havuzunda ayrılması yoluyla gerçekleşmektedir. Aktif çamur proseslerinde MP giderim verimi literatürde %3,6 ile %98 arasında tespit edilmiştir. Bu geniş değişkenlik aralığı MP özelliklerinin yanısıra çamur bekletme süresi, besin yükü gibi işletme parametrelerine bağlıdır [1]. MBR'ler yüksek ve tutarlı giderim verimleri sağlamakta olup çalışmalarda MBR sistemlerinde %99,4 ile %99,9 arasında MP giderim verimleri rapor edilmiştir [1,7]. Talvitie ve ark. [7] tarafından Finlandiya'daki dört AAT'de ikincil arıtma sonrası uygulanan MBR'nin %99,9, disk filtrenin %40-98,5, çözünmüş hava flotasyonunun %95 ve hızlı kum filtrasyonunun %97 giderim verimi sağladığı belirlenmiştir. Üçüncül arıtma kademesinde uygulanan membran filtrasyon (mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, ters ozmoz gibi), ileri oksidasyon prosesleri (ozonlama, Fenton/foto-Fenton, fotokataliz gibi), klorlama ve UV dezenfeksiyonu gibi yöntemler atıksudan MP giderim verimini artırabilmektedir. Ancak oksidatif proseslerin MP'lerin yüzey yapısını değiştirdiği ve bu durumun nanoplastik oluşumuna neden olabildiği tespit edilmiştir [1,8].

Literatür bilgileri AAT'lerdeki toplam MP giderim veriminin genel olarak %60 ile %99,9 arasında değiştiğini göstermektedir [1,2,9]. Örneğin MP giderimi Çin'deki bir AAT'de %64,4, Avustralya'da bir AAT'de %66, Kanada'da bir AAT'de %91,7 ve Finlandiya'da bir AAT'de %99,9 olarak rapor edilmiştir. Membran teknolojileri ve filtrasyon prosesleri içeren AAT'lerde genellikle daha yüksek MP giderim verimi elde edilirken konvansiyonel biyolojik arıtma proseslerinin tek başına yeterli düzeyde giderim sağlayamadığı görülmektedir [1]. İleri arıtım

sağlayan AAT'ler de bile deşarj edilen yüksek atıksu debileri nedeniyle alıcı ortama günlük milyonlarca MP deşarjı gerçekleşmektedir. Ayrıca sudan giderilen MP'ler tamamen yok edilmemekte çamur fazda alıkonmaktadır [1,10]. Aynı arıtma proseslerinden oluşan AAT'lerde MP giderimlerinde farklılıklar gözlenmektedir. Aktif çamur-A2O prosesinin kullanıldığı Pekin'deki bir AAT'de MP giderim verimi %54,5 olarak rapor edilirken, Şangay'daki benzer teknolojiye sahip bir tesiste MP giderimi %26 olarak rapor edilmiştir [1]. Bu farklılık su karakterizasyonu, işletme parametreleri, MP boyut ve şekil dağılımı, numune alma ve analiz yöntemleri gibi pek çok faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle aynı proseslere sahip tesislerde bile her AAT için kendi işletme koşullarında MP kirlilik yükü değerlendirilmelidir.

2.3. Mikroplastiklerin Fizikokimyasal Değişimi: Yaşlanma, Parçalanma ve Nanoplastik Oluşumu

AAT'lerki arıtma süreçlerinde MP'lerin fizikokimyasal özellikleri değişmektedir. AAT'ler MP'ler için sadece bir taşıyıcı değil, aynı zamanda önemli bir MP oluşum kaynağıdır [10]. AAT'de pompa, karıştırma, havalandırma gibi mekanik işlemlerde su kesme kuvvetleri ve türbülansın etkisiyle MP'lerin boyut ve fiziksel olarak değişime uğramasına neden olmaktadır [10,11]. Arıtma proseslerinde uygulanan kimyasal işlemler de MP'lerin yaşlanmasına neden olmaktadır. UV/H₂O₂, UV/klor, Fenton ve foto-Fenton gibi ileri oksidasyon prosesleri sudan organik kirletici gidermek için uygulanmaları esnasında MP yüzeyleriyle etkileşime girerek yaşlanma sürecini hızlandırmaktadır [11]. Bu süreçte MP'lerin rengi, morfolojisi, boyutu gibi fizikokimyasal özellikleri değişerek yapısal bozunma gerçekleşmektedir. Ayrıca bu değişimler MP'lerin yalnızca fiziksel değişimine neden olmamakta aynı zamanda plastik üretiminde kullanılan plastikleştiriciler, alev geciktiriciler, stabilizatörler gibi katkı maddelerinin su ortamına geçmesine neden olarak çevresel risk kaynağı oluşturmaktadır [11]. Ayrıca klorlama işlemi sırasında polistiren gibi polimerlerde yeni karbon-klor bağlarının oluşumu MP'lerin hidrofobitesini ve dolayısıyla diğer kirleticileri adsorbe etme kapasitesini artırdığı rapor edilmiştir [1].

Mekanik ve kimyasal kuvvetlerin etkisiyle MP'ler NP'ye dönüşmektedir. Monira ve ark. [8] AAT'lerin her bir arıtma ünitesinde su kesme kuvvetlerinin etkisiyle MP'den NP'ye parçalanmanın meydana gelebileceği rapor etmiştir. Konvansiyonel arıtma prosesleri MP'lerin yaklaşık %95'ini giderirken bu süreçte oluşan NP'lerin mevcut analiz tekniklerinin tespit sınırlarının altında kalması nedeniyle gerçek yük ve akıbeti tam olarak bilinmemektedir. NP'ler küçük boyutları ile daha fazla yüzey alanına sahip olduklarından kimyasal kirletici adsorplama kapasiteleri yüksek olup ayrıca hücresel bariyerleri (bağırsak epiteli, solungaç epiteli, hatta hücre zarı) geçme potansiyeli artmaktadır. Bu nedenle AAT'lerde kullanılan MP giderim proseslerinde sadece MP sayısı azaltımına değil, aynı zamanda parçalanma potansiyelinin en aza indirilmesine de odaklanılması gerekmektedir [10,11]. Bu durum çamur arıtma süreçleri içinde benzerdir. Çamur stabilizasyonu için kullanılan aerobik/anaerobik çürütme süreçlerinde yüksek sıcaklık, karıştırma ve bekletme süreleri sonucunda MP'ler yapısal değişimi ve katkı maddelerinin çamur sıvı fazına geçişi söz konusudur. Arıtma sürecinde gerçekleşen mikrobiyal aktivite MP'lerin yoğunluğunu ve kimyasal kirletici adsorpsiyon kapasitesini de önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla MP'lerin AAT içerisindeki akıbeti saadec su fazındaki arıtma

üniteleriyle sınırlı kalmayıp, çamur işleme hattının tamamını kapsayan bütüncül bir süreç olarak ele alınmalıdır.

3. ÇEVRESEL RİSK DEĞERLENDİRMESİ VE TARTIŞMA

3.1. Arıtma Çamuru Yoluyla Mikroplastiklerin Karasal Ekosisteme Taşınımı

Stabilize arıtma çamuru organik madde ve besin elementleri açısından zengin olması nedeniyle tarım arazilerine biyokatı/gübre olarak uygulanmaktadır. Ancak bu uygulama atıksu arıtımı sürecinde atıksudan ayrılan ve çamurda biriken MP'lerin karasal ekosistemlere doğrudan taşınımına neden olmaktadır [11,12]. Corradini ve ark. [11] İspanya'da farklı sayıda biyokatı uygulaması yapılmış 31 tarım arazisinde tarlalarda tespit edilen MP içeriğinin, geçmişte uygulanan biyokatı sayısı ile istatistiksel olarak anlamlı biçimde ilişkili olduğu belirlemiştir. Çamur örneklerinde MP miktarı 18 ila 41 MP/g arasında elde edilirken bir, iki ve üç kez biyokatı uygulaması yapılan arazilerde 1,1 ila 1,7 MP/g, dört ve beş kez uygulama yapılan arazilerde ise 2,3 ila 3,5 MP/g rapor edilmiştir. Bu durum uzun vadeli, kümülatif bir kirlenme durumunu göstermektedir. Crossman ve ark. [12] tarafından gerçekleştirilen derleme çalışmada ise biyokatı uygulaması sonrasında toprakta MP miktarının kontrol alanlarına kıyasla %723 ile %1445 arasında arttığı, bu artışın 22 yıl ve daha uzun süre sabit kaldığı, dolayısıyla MP'lerin toprakta oldukça kalıcı bir kirleticisi olduğu belirtilmiştir. Uzun süreli izleme çalışmaları, biyokatı kaynaklı toprakta bulunan MP'lerin genellikle beyaz/şeffaf renkli, film ve fiber yapıda olduğunu ve MP'lerin toprakta ikincil MP/NP oluşumuna katkı sağladığını göstermektedir.

MP'ler toprağın fiziksel yapısını (gözeneklilik, su tutma kapasitesi, agregat stabilitesi gibi), mikrobiyal topluluk kompozisyonunu ve toprak solucanları gibi anahtar organizmaların davranışını ve fizyolojisini etkileyebilmektedir. Ayrıca MP'ler yapısındaki (alev geciktiriciler, bisfenol A gibi) katkı kimyasalları ve yüzeylerine adsorbe olan (ağır metaller, poliklorlu bifeniller ve poliaromatik hidrokarbonlar gibi) kirleticileri de içermektedir. Tahmini olarak, dünya genelinde on altı ülke arasında biyokatı uygulaması yoluyla tarım arazilerine yıllık $8,2 \times 10^{10}$ ila $1,29 \times 10^{15}$ arasında MP ulaştığı öngörülmektedir. Toprakta biriken MP'ler zaman içerisinde yüzey akışı yoluyla yakın su kaynaklarına ve denizlere taşınmakta, derinlere sızarak yeraltı suyu kalitesini etkileyebilmektedir. Biyokatıların tarımsal uygulamalarında MP açısından belirli bir yönetmelik değeri bulunmamakta olup ülkelerin biyokatı uygulama süreçlerini MP riskini de kapsayacak şekilde düzenlemesi önemlidir.

3.2. Mikroplastiklerin Kimyasal Kontaminant Taşıyıcılığı ve Ekotoksikolojik Etkiler

MP'lerin küçük boyutu, geniş özgül yüzey alanı ve hidrofobik doğası, ağır metaller, pestisitler, kalıcı organik kirleticiler, farmasötikler ve patojenler için etkin bir taşıyıcı işlevi görmektedir [13]. Banaee ve ark. [13] MP'lerin hidrofobik veya düşük çözünürlüklü ksenobiyotiklerin biyoyararlanımını ve toksisitesini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca yaşlanmış veya biyofilm kaplı MP'ler daha yüksek metal adsorpsiyon kapasitesine sahip olmakta ve bu durum metallerin çevresel hareketliliğini ve biyoyararlanımını artırmaktadır. MP'lerin polietilen gibi bazı polimerlerinin pestisitlerin bozunma hızını, dağılımını ve kalıcılığını etkileyebildiği rapor edilmiştir [13].

Organizmalar tarafından alınan MP'ler canlının sindirim sisteminde düşük pH ve yüksek enzim aktiviteleri nedeniyle hem yapısal katkı kimyasallarına (plastikleştiriciler, alev geciktiriciler, stabilizatörler, boyalar ve dolgu maddeleri gibi) hem de yüzeylerine adsorbe olmuş kirleticilerin biyoyararlanımının artmasına neden olabilmektedir. Bu durum, MP maruziyetinin tek bir kirletici maruziyeti olarak değil, çoklu kirletici karışımına eşzamanlı maruziyet olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. MP-ağır metal bileşiminin akuatik ve karasal organizmalarda oksidatif stres, çoklu organ hasarı ve endokrin bozulması gibi sinerjistik toksisite etkilerine yol açabildiği, bu etkilerin besin zinciri boyunca biyobirikim riskini artırarak insana kadar ulaşabildiği rapor edilmiştir. Ayrıca ftalatlar ve polibromlu difenil eterler gibi bazı katkı maddelerinin bilinen endokrin bozucu bileşikler olması potansiyel sağlık risklerini artırmaktadır.

MP'ler akuatik organizmalar üzerinde davranışsal, fizyolojik ve hücresel düzeyde etkiler göstermektedir. MP maruziyeti organizmalarda beslenme, yüzme, üreme ve predatör kaçınma davranışlarında değişimlere neden olmakta solungaç ve bağırsak dokularında fiziksel hasar, enflamasyon ve oksidatif stres gözlenmektedir. MP'lerin doku düzeyinde biyoakümüle olması trofik düzeyler arasında transfer olabileceğini ve bu durumun insan maruziyeti açısından riskler içerdiğini göstermektedir. Bireysel kirletici bazında yapılan risk değerlendirme çalışmaları MP'lerin çoklu kontaminant taşıyıcılığı nedeniyle gerçek maruziyet senaryosunu yeterince yansıtmamaktadır. Bu nedenle kümülatif ve sinerjistik etkilerin de risk değerlendirme süreçlerine dahil edilmesi önemlidir [13].

3.3. Politika ve Mevzuat Çerçevesi ile İleri Arıtma Teknolojilerinin Uygulanabilirliği

Son yıllarda MP'lerin risklerine yönelik artan farkındalık düzenleyici çerçevelerde güncellemeler yapılmasını gerektirmiştir. Avrupa Birliği, 1991 yılında yürürlüğe giren Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi'ni (91/271/EEC) revize ederek Kasım 2024'te (EU) 2024/3019 sayılı yeni direktifi kabul etmiştir [3]. Revizyon ile mikrokirleticiler (ilaç kalıntıları, kozmetik bileşenleri, mikroplastikler ve PFAS dahil) ile iklim etkilerine yönelik yeni yükümlülükler getirilmiştir [4]. Evsel atıksu dışında endüstriyel deşarj, hastane atıksuları ve ticari kaynaklardan gelen atıksuların da ağır metaller, MP'ler ve mikrokirleticiler açısından düzenli olarak izlenmesini ve raporlanmasını zorunluluğu eklenmiştir [3]. Ayrıca 150.000 nüfus eşdeğeri ve üzerindeki AAT'lere aşamalı olarak dördüncül arıtım yükümlülüğü getirilmiştir. Bu kapsamda söz konusu tesislerin, mikrokirleticilerin gideriminde 2033 yılına kadar %20'sinin, 2039 yılına kadar %60'ının ve 2045 yılına kadar tamamının uyum sağlaması öngörülmektedir [3,4].

AAT'lere eklenecek ileri arıtma teknolojileri değerlendirildiğinde, membran biyoreaktörler ve mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, disk filtreler, hızlı kum filtreleri gibi filtrasyon temelli prosesler yüksek MP giderim verimi sağlayan yöntemlerdir [1,7]. Ancak bu teknolojilerin geniş ölçekli kentsel AAT'lerde uygulanabilirliği yüksek enerji, yatırım ve işletme maliyeti gibi kısıtlar içermektedir. Koagülasyon temelli arıtmalar MP giderimi sağlamakla birlikte giderim verimi MP konsantrasyon/şekil/polimer türü, koagülant dozu, pH özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [1]. İleri oksidasyon prosesleri MP gideriminde etkin olmakla birlikte mineralizasyon için gereken süre ve enerji girdisi önemli bir kısıt oluşturmakta ayrıca ara

ürünler ve NP oluşumuna neden olabilmektedir [1]. Bu nedenle Atıksu Arıtımı Direktifi'nin uygulanabilmesi için mühendislik ve finansman planlaması yapılması gereklidir. Dördüncü arıtım kademesinin tesislere ilavesi arazi ihtiyacı, enerji ihtiyacı ve nitelikli personel gerektirmektedir. Bu durum sadece AB üyesi ülkeleri değil, AB ile ticari ve çevresel entegrasyon ilişkisi bulunan ülkeleri de etkilemektedir. Bu nedenle AAT'lerin altyapılarının MP ve diğer mikrokirleticileri de kapsayacak şekilde değerlendirmesi önemlidir. Ülkemizde AAT'lerde MP karakterizasyonu ve giderim verimine ilişkin sınırlı sayıda çalışma bulunmakta olup mevcut çalışmalar büyük ölçüde belirli havzalarda gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle ulusal ölçekte standartlaştırılmış MP izleme ağlarının kurulması gereklidir.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Atıksu deşarjları ve biyokatı uygulamaları MP'lerin akuatik ve karasal ekosistemlere taşınımında önemli bir rol oynamaktadır. Konvansiyonel arıtma proseslerinin MP giderimi sağlamakla birlikte yüksek hacimli atıksu deşarjları nedeniyle AAT'ler alıcı ortamlara halen önemli miktarda MP taşımaktadır. Literatürde saha çalışmaları, biyokatı uygulamalarının MP taşınımına neden olduğunu ve bu birikimin uzun yıllar boyunca kalıcı olabildiğini göstermektedir. Son yıllarda artan su ihtiyacı ve iklim değişikliği nedeniyle ülkemizde tarımsal sulamada arıtılmış atıksuyun yeniden kullanım talebi artmıştır. Bu nedenle biyokatı ve arıtılmış atıksu yoluyla tarım arazilerine ve su ekosistemine taşınan MP'lerin gıda güvenliği ve toprak sağlığı açısından potansiyel risklerinin değerlendirilmesi önemlidir. Ayrıca bu değerlendirme sadece MP partikül sayısının izlenmesiyle sınırlı kalmamalı MP'lerin taşıdığı katkı kimyasalları ve adsorbe kirleticileri de içerecek şekilde çok boyutlu bir risk değerlendirmesini kapsamalıdır.

Ülkemizde AAT'lerde MP kirliliğinin daha sağlıklı bir şekilde yönetilebilmesi için ulusal ölçekte standartlaştırılmış MP örnekleme ve analiz protokolleri geliştirilmelidir. Büyük ve orta ölçekli AAT'lerde düzenli MP izleme ağlarının kurulması ve giriş-çıkış-çamur dengesinin sistematik olarak takip edilmesi gereklidir. Biyokatı uygulaması yapılan tarım arazilerinde MP birikimi ve olası gıda zinciri etkileri araştırılmalıdır. İleri arıtma teknolojileri özellikle hassas alıcı ortamlara deşarj yapan tesislerde değerlendirilmelidir. MP'lerin taşıdığı kimyasal kirleticileri de kapsayan bütüncül ekotoksikolojik risk değerlendirme süreçlerinin gerçekleştirilmesi su ve toprak kaynaklarının uzun vadeli sürdürülebilirliğinin güvence altına alınmasını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Bodzek, M., Pohl, A., Rosik-Dulewska, C., Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies, Water, 16(24), 3574, 2024.
- [2] Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., Cao, Z., Zhang, T., A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: characteristics and mechanisms, Environment International, 146, 106277, 2021.
- [3] Avrupa Parlamentosu ve Konseyi, Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast), Official Journal of the European Union, L 2024/3019, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ%3AL_202403019_2024 (Erişim tarihi: 01.07.2026).

- [4] Council of the European Union, Urban wastewater: Council adopts new rules for more efficient treatment (basın açıklaması), <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/11/05/urban-wastewater-council-adopts-new-rules-for-more-efficient-treatment/>, 2024 (Erişim tarihi: 01.07.2026).
- [5] Acarer Arat, S., A review of microplastics in wastewater treatment plants in Türkiye: Characteristics, removal efficiency, mitigation strategies for microplastic pollution and future perspective, *Water Science & Technology*, 89(7), 1771-1786, 2024.
- [6] Napper, I.E., Thompson, R.C., Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions, *Marine Pollution Bulletin*, 112(1-2), 39-45, 2016.
- [7] Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., Setälä, O., Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies, *Water Research*, 123, 401-407, 2017.
- [8] Monira, S., Roychand, R., Hai, F.I., Bhuiyan, M., Dhar, B.R., Pramanik, B.K., Nano and microplastics occurrence in wastewater treatment plants: A comprehensive understanding of microplastics fragmentation and their removal, *Chemosphere*, 334, 139011, 2023.
- [9] Cristaldi, A., Fiore, M., Zuccarello, P., Oliveri Conti, G., Grasso, A., Nicolosi, I., Copat, C., Ferrante, M., Efficiency of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) for Microplastic Removal: A Systematic Review, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 8014, 2020.
- [10] Wu, X., Zhao, X., Chen, R., Liu, P., Liang, W., Wang, J., Teng, M., Wang, X., Gao, S., Wastewater treatment plants act as essential sources of microplastic formation in aquatic environments: A critical review, *Water Research*, 221, 118825, 2022.
- [11] Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., Geissen, V., Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal, *Science of the Total Environment*, 671, 411-420, 2019.
- [12] Crossman, J., Hurley, R., Futter, M., Nizzetto, L., Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment, *Science of the Total Environment*, 724, 138334, 2020.
- [13] Banaee, M., Falco, F., Oryan, A., Gholamhosseini, A., Padehban, J., Soltanian, S., Ecotoxicology of microplastics in water ecosystems and aquatic organisms: A review of synergistic and antagonistic effects of microplastics on other xenobiotics, *Marine Pollution Bulletin*, 224, 119115, 2025.

YENİ ORTAYA ÇIKAN KİRLETİCİLER OLARAK UYUŞTURUCU MADDELER: ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE AKİBET VE ÇEVRESEL RİSK

Prof. Dr. Senar AYDIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, sozcan@erbakan.edu.tr - 0000-0002-0960-480X

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, meaydin@erbakan.edu.tr - 0000-0001-6665-198X

ÖZET

Son yıllarda yeni ortaya çıkan kirleticiler olarak değerlendirilen uyuşturucu maddeler kentsel atıksu arıtma tesisleri (AAT) vasıtasıyla çevreye salınmakta ve su, toprak ve sediman gibi çevresel ortamlarda sıklıkla tespit edilmektedir. Uyuşturucu maddeler kullanımdan sonra ana bileşik veya metobilit formunda vücuttan atılmakta ve kanalizasyon şebekesi vasıtasıyla kentsel AAT'ye ulaşmaktadır. Ayrıca doğrudan tuvalete dökülen maddeler, kaçak üretim tesisi deşarjları ve hastane atıksuları da uyuşturucunun diğer kaynaklarıdır. Konvansiyonel biyolojik arıtma prosesi içeren AAT'ler polar ve kısmen kalıcı yapıdaki uyuşturucu maddelerin gideriminde yetersiz kalmaktadır. Bu durum söz konusu bileşiklerin deşarj suları vasıtasıyla yüzeysel su kaynaklarına ulaşmasına ve sucul ekosistemler için potansiyel bir ekolojik risk oluşturmaya neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında atıksu temelli epidemiyoloji yaklaşımı (WBE) ile uyuşturucu madde kullanımının izlenmesi, bu maddelerin atıksudaki kaynakları ve akıbeti ile oluşturdukları çevresel riskler güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir. WBE uygulamaları toplum düzeyinde nesnel ve yarı gerçek zamanlı tüketim verisi sunarken biyobelirteç kararlılığı ve nüfus tahmini gibi konularda standardizasyon ihtiyacı sürmektedir. Akutik ekosistem de uyuşturucu maddeler akut toksisite bakımından sınırlı risk sergilemeler de kronik ve düşük doz maruziyetin davranışsal ve fizyolojik etkiler oluşturabildiği rapor edilmiştir. Avrupa'da 128 şehirde yürütülen güncel izleme çalışmalarında kokain ve ketamin kalıntılarında artış, MDMA kalıntılarında ise belirgin bir azalış gözlenirken; Türkiye'de 11 ilde 18 atıksu arıtma tesisinde yürütülen kapsamlı bir çalışmada en yüksek tüketimin kannabis (5412 mg/1000 kişi/gün) olduğu belirlenmiştir. Konya kentsel AAT'sinde bir yıl boyunca yürütülen izleme çalışmasında giderim verimlerinin bileşiğe bağlı olarak %20 ile %87 arasında değiştiği, THC-COOH'nin ise sucul organizmalar için yüksek ekolojik risk ($RQ > 1$) oluşturduğu tespit edilmiştir. AAT'de giderimleri açısından ileri arıtım proseslerinin değerlendirilmesini gerekliliği sözkonusu iken işletme maliyeti, enerji tüketimi ve yan ürün oluşumu gibi kısıtlar AAT'lerde uygulanabilirliği sınırlamaktadır. Türkiye'de uyuşturucu maddelerinin izlenmesi ve araştırılması alanında henüz yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, uyuşturucu maddelerin çevresel risklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için izleme ağlarının genişletilmesi, standart örneklem/analiz protokollerin geliştirilmesi, ekotoksikolojik risklerin değerlendirilmesi, ileri arıtma teknolojilerinin entegrasyonunun fizibilite açısından incelenmesi gereklidir.

Anahtar Kelimeler: Atıksu temelli epidemiyoloji, uyuşturucu madde, çevresel risk değerlendirmesi, atıksu arıtma tesisi.

1. GİRİŞ

Günümüzde uyuşturucu tüketimi hem bireysel sağlık açısından hem de toplumsal düzeyde önemli bir sorundur. Birleşmiş Milletler Uyuşturucu ve Suç Ofisi (UNODC) ve Avrupa Birliği Uyuşturucu Ajansı (EUDA) gibi kurumların yayımladığı raporlar, küresel uyuşturucu kullanımının artmakta olduğunu ve yeni psikoaktif maddelerin sürekli olarak piyasaya girdiğini göstermektedir. Kullanım sonrasında ana bileşik ve metaboliti formunda vücuttan atılan bileşikler kentsel kanalizasyon sistemine ulaşmakta olup bu maddelerin çevresel kirleticiler olarak değerlendirilmesi gereklidir. Yeni ortaya çıkan kirleticiler olarak tanımlanan uyuşturucu ve metabolitleri yüzey suyu, yeraltı suyu, toprak ve sediman gibi ortamlarda yaygın olarak tespit edilmektedir [1]. Bu durum halk sağlığı ve kolluk politikaları açısından dinamik bir izleme ihtiyacı gerektirmektedir. Anketler, tedavi kayıtları, el koyma istatistikleri gibi geleneksel madde kullanım yöntemleri uyuşturucu kullanımı ile ilgili kısmi ve genellikle geriye dönük bilgiler sunmaktadır [2].

Kentsel atıksu arıtma tesisleri (AAT) genellikle biyolojik arıtma prosesleri içermektedir ve konvansiyonel (askıda katı madde, azot, fosfor gibi) kirleticilerin giderimleri için tasarlanmıştır. Bu nedenle hidrofilik ve kalıcı mikrokirleticilerin giderimi için yeterli değildirler. AAT’de kısmen giderilse de uyuşturucu ve metabolitleri deşarj suyu ile alıcı ortama deşarj edilmektedir. Literatürde içme suyu, yüzey suyu ve atıksu örneklerinde uyuşturucu ve metabolitlerinin maddelerin (benzoilekgonin, metamfetamin, amfetamin, metadon ve kodein) ng/L düzeyinde tespit edildiği görülmektedir [1].

Uyuşturucu ve metabolitlerinin atıksuda tespiti çevresel kirlilik göstergesi olmasının yanı sıra son yıllarda toplum düzeyinde madde kullanımını izlemek için kullanılan önemli bir kaynaktır. Atıksu temelli epidemiyoloji (Wastewater-Based Epidemiology, WBE) yaklaşımı olarak adlandırılan bu yöntemde yerleşim bölgesine hizmet veren AAT’nin giriş atıksuyunda uyuşturucu maddelerin insan vücudunda oluşan ana metabolitleri tespit edilerek geriye hesaplama yoluyla toplum düzeyinde tüketim miktarının tahmin edilmektedir [2]. WBE yaklaşımı ile uyuşturucu tüketimi ile ilgili nesnel veri üretilebilmektedir. Bununla birlikte WBE yöntemi bireysel kullanıcı davranışı hakkında bilgi vermemektedir. Biyobelirteçlerin kanalizasyon fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik koşullarına bağlı olarak değişimi, nüfusun tahmin edilmesindeki belirsizlikler, örnekleme/analiz protokollerinin standardize edilmemiş olması gibi nedenler sonuçların karşılaştırılabilirliğini ve güvenilirliğini sınırlandırmaktadır [2,4]. 2011 yılından bu yana Avrupa ölçeğinde, Sewage Analysis CORE group Europe (SCORE) ağı ve EUDA işbirliğiyle WBE yaklaşımlı atıksu izleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Türkiye’nin de dahil olduğu sistemde kokain ve ketamin kalıntılarında artan, MDMA kalıntılarında ise belirgin biçimde azalan bir eğilim gözlenmektedir [6,7]. Aynı zamanda WBE yaklaşımı büyük ölçekli etkinlikler (festival, spor organizasyonu, tatil dönemleri vb.) sırasında tüketim miktarlarının belirlenmesinde kullanılabilmektedir.

Çevresel risk açısından değerlendirildiğinde uyuşturucu ve metabolitleri akuatik ekosistemde genellikle ng/L düzeyinde tespit edilmektedir. Bu konsantrasyonlarda akut toksisite oluşturma potansiyeli sınırlı olmakla birlikte kronik maruziyetin sucul organizmalar üzerinde davranışsal

ve fizyolojik etkilere yol açabileceği rapor edilmiştir [1]. Ayrıca sularda uyuşturucu ve metabolitlerinin farklı mikrokirleticiler ile eş zamanlı bulunması bireysel madde bazında yapılan risk değerlendirmelerinin gerçek maruziyet senaryosunu tam olarak yansıtmamaktadır. Bu nedenle mevcut konvansiyonel arıtma teknolojilerinin mikrokirleticilerin giderimlerini de sağlayacak şekilde ileri arıtma prosesleri (ileri oksidasyon, ozonlama, aktif karbon adsorpsiyonu, nanofiltrasyon/ters ozmoz gibi membran teknolojileri) ile modifiye edilmesi gerekliliği oluşmaktadır. Ancak bu teknolojilerin yüksek işletme maliyeti, artan enerji tüketimi ve olası toksik yan ürün oluşumu gibi olumsuzlukları kentsel AAT’lerde uygulanabilirliği sınırlandırmaktadır.

Ülkemiz yarı kurak iklim kuşağında yer almakta olup iklim değişikliği nedeniyle su talebi gittikçe artmaktadır. Bu durumda arıtılmış atıksuyun tarımsal sulama ve yüzeysel su kaynaklarının beslenmesi gibi amaçlarla yeniden kullanımı önem kazanmaktadır. Ancak arıtılmış sularda uyuşturucu madde kalıntılarının varlığı, yalnızca doğal su ekosistemleri için değil, dolaylı yoldan tarımsal ürünler ve su kaynakları açısından riskler içermektedir. Uyuşturucu maddelerin izlenmesi ve araştırılması alanında Türkiye’de henüz yeterli sayıda akademik çalışma bulunmamaktadır. Bu durum hem çevresel risk değerlendirmesi hem de halk sağlığı açısından önemli bir bilgi boşluğuna işaret etmektedir. Bu çalışmanın amacı WBE yaklaşımının temel ilkelerini, uyuşturucu maddelerin atıksuya giriş yollarını ve AAT’lerdeki akıbetini, bu maddelerin oluşturduğu çevresel ve ekotoksikolojik riskleri ve bu kapsamda Türkiye özelinde mevcut durumu değerlendirmektir.

2. ATIKSU TEMELLİ EPİDEMİYOLOJİ VE UYUŞTURUCU MADDELERİN ATIKSUDAKİ AKİBETİ

2.1. Atıksu Temelli Epidemiyoloji Yaklaşımı

Atıksu temelli epidemiyoloji (WBE) yaklaşımı AAT’ye bağlı kanalizasyon şebekesinde toplanan ham atıksuda, kullanıcı vücudunda oluşan ve idrar/feçes yoluyla atılan uyuşturucu madde veya metabolitlerin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Maddenin insan vücudundaki atılım oranı, AAT’ye ulaşan atıksu debisi ve hizmet edilen nüfus büyüklüğü kullanılarak geriye dönük hesaplama yöntemiyle toplum düzeyinde günlük tüketim miktarı tahmin edilmektedir. Hesaplama yönteminde öncelikle ölçülen biyobelirteç konsantrasyonu ile günlük atıksu debisi çarpılarak AAT’ye ulaşan günlük kütle yükü belirlenmektedir. Sonra kütle yükü, ilgili maddenin ana bileşiğe dönüştürme katsayısı ve atılım oranı kullanılarak tüketilen madde miktarına çevrilmektedir. Daha sonra ise tesisin hizmet verdiği nüfusa bölünerek kişi başına günlük tüketim miktarı (mg/gün/1000 kişi) hesaplanmaktadır [2].

Hesaplamanın güvenilirliği açısından arıtma tesisinin hizmet verdiği nüfusun doğru tahmin edilmesi önemlidir. Resmi nüfus sayım verilerinin kullanımı ile birlikte atıksuda yaygın olarak bulunan ve nüfusla orantılı değişen bazı biyobelirteçler (amonyum azotu, kreatinin, kafein metabolitleri gibi) normalizasyon parametresi olarak kullanılabilir. Atıksuyun örneklenmesi ve örneklem sonrası analiz sürecine kadar uygun şartlarda saklanması biyobelirteçlerin bozunmasını önlemek açısından önemlidir. Genellikle AAT girişinden 24 saatlik kompozit numune veya ardışık günler boyunca genellikle bir hafta örnek alınması

yaygın uygulamalardır. Numunelerin analiz öncesinde genellikle 4 °C'nin altındaki sıcaklıklarda saklanması ve kısa sürede analize alınması da önemlidir.

WBE yaklaşımı bireysel beyana dayanmamakta olup, neredeyse gerçek zamanlı ve sık örnekleme imkânı verdiği için madde kullanım değişiminin izlenmesine imkân sunmaktadır. Yeni psikoaktif maddelerin ortaya çıkışının tespitinde ve uyuşturucu kullanımının tahmin edilmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır [2]. Uyuşturucu kullanımının tahmininde kullanılan diğer yöntemlerdeki erişim, maliyet ve güvenilirlik sınırlamalarının önemli bir kısmını ortadan kaldırmakta ayrıca istatistiklerine yansımayan ve görünmeyen kullanıcı kitlesi hakkında da dolaylı bilgi vermektedir.

Bununla birlikte WBE yaklaşımı bireysel uyuşturucu kullanıcı davranışı, kullanım sıklığı veya kullanıcı demografisi hakkında doğrudan bilgi vermemektedir. Ayrıca, biyobelirteçlerin kanalizasyon içinde özellikle uzun kanalizasyon hatlarına sahip büyük şehirlerde sıcaklık, pH ve mikrobiyal aktivite gibi fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik koşullara bağlı olarak değişime uğraması bazı maddeler için belirsizlik kaynağı oluşturmaktadır. Hizmet edilen nüfusun doğru tahmin edilememesindeki belirsizlikler ve örnekleme/analiz protokollerinin uluslararası düzeyde standardize edilmemiş olması da sonuçların karşılaştırılabilirliğini ve güvenilirliğini sınırlandıran başlıca etmenler olarak literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır [2,4].

Atıksuda maddelerin tespiti için numune hazırlama aşamasında genellikle katı faz ekstraksiyonu (SPE) kullanılmakta ve sıvı kromatografi-tandem kütle spektrometrisi (LC-MS/MS) ile düşük konsantrasyonlu maddelerin yüksek hassasiyet, seçicilik ve doğrulukta tespiti sağlanmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemin yüksek cihaz maliyeti ve uzman personel gerektirmesi özellikle gelir düzeyi düşük ülkelerde uyuşturucu madde tespitlerini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle daha hızlı, düşük maliyetli ve alanda (in-situ) uygulanabilir alternatif yöntemlerin geliştirilmesi gereklidir [3].

2.2. Uyuşturucu Maddelerin Atıksuya Giriş Yolları ve Atıksudaki Akıbeti

Atıksudaki uyuşturucu maddelerin ana kaynağı kullanıcıların vücudundan idrar ve feçes yoluyla attığı ana bileşik ve metabolitlerdir. Ayrıca doğrudan tuvalete dökülen maddeler, kaçak üretim/işleme tesislerinden kaynaklanan deşarjlar, madde bağımlılığı tedavi merkezlerinin atıksuları ve hastanelerin atıksuları da uyuşturucu madde kaynaklarıdır [1]. Atıksu arıtma tesisleri konvansiyonel kirleticilerin giderimi için tasarlanmış olmakla birlikte mikrokirleticileri de kısmen gidermektedir. Mikrokirleticiler bu arıtım sürecinde esas olarak biyodegradasyon ve adsorpsiyon yoluyla atıksudan uzaklaştırılmaktadır. Bununla birlikte polar ve hidrofilik yapıdaki uyuşturucu madde ve metabolitlerinin adsorpsiyon yoluyla giderimi sınırlı olmakta ve büyük ölçüde biyolojik parçalanma ile giderilmektedir [5]. Biyolojik parçalanmaya karşı dirençli olan bu kirleticiler konvansiyonel aktif çamur sistemleri içeren arıtma tesislerinde tam olarak giderilememekte ve arıtılmış deşarj suyu ile alıcı ortama deşarj edilmektedir. Bu durum, AAT'lerin uyuşturucu maddelerin çevresel döngüsünde bir bariyer değil, aksine kontrollü bir taşınım noktası işlevi gördüğünü ortaya koymaktadır.

2.3. Küresel ve Avrupa Ölçeğinde Güncel İzleme Verileri

2011 yılından beri Avrupa'da, Sewage Analysis CORe group Europe (SCORE) ağı ve EUDA işbirliğiyle atıksu izleme çalışması gerçekleştirilmektedir. Çalışmalarda en yüksek kokain ve

metamfetamin tüketim düzeylerinin Amerika Birleşik Devletleri'nde, en düşük düzeylerin ise Asya kıtasında rapor edildiği göstermektedir [2]. 24 AB üyesi ülke, Türkiye ve Norveç'den 128 şehirde, Mart-Mayıs 2024 döneminde bir hafta boyunca günlük örnekleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda MDMA, kokain ve amfetamin miktarının 2023 yılına oranla artış gösterdiği kannabis miktarında ise azalma olduğu gözlenmiştir [6]. Mart-Mayıs 2025 döneminde ise MDMA miktarında belirgin bir düşüş gözlenirken kokain ve özellikle ketamin miktarında artış gözlenmiştir [7]. Her iki çalışmada da kokain, MDMA ve ketamin miktarının şehirlerin büyük bölümünde hafta sonu döneminde daha yüksek düzeylere ulaştığı; amfetamin, metamfetamin ve kannabis kalıntılarının ise hafta boyunca dağılım gösterdiği belirlenmiştir [6,7]. Bu durum kokain, MDMA ve ketaminin büyük ölçüde eğlenme bağlamında kullanıldığını, amfetamin ve metamfetaminin ise günlük yaşamda daha düzenli bir kullanım sergilediğini göstermektedir.

Daglioglu ve ark. [11] tarafından 2019 yılında 11 ilde (Ankara, Adana, Diyarbakır, Şanlıurfa, Gaziantep, Kayseri, Mersin, Konya, Erzurum, Van ve Trabzon) bulunan 18 AAT'de ortalama tüketim değerleri kokain için 14,7 mg/1000 kişi/gün, amfetamin için 9,5 mg/1000 kişi/gün, metamfetamin için 34,5 mg/1000 kişi/gün, MDMA için 38,4 mg/1000 kişi/gün, eroin için 42,2 mg/1000 kişi/gün ve kannabis için 5412 mg/1000 kişi/gün olarak tespit edilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Türkiye'de Farklı İllerde Tahmin Edilen Uyuşturucu Kullanım Miktarları (mg/1000 kişi/gün) [11]

İl	Kokain	Amfetamin	Metamfetamin	MDMA	Eroin	THC
Adana	14,48	10,42	10,68	59,57	38,76	8103,69
Ankara	13,56	8,31	4,73	11,55	29,57	6166,51
Diyarbakır	40,98	4,21	26,26	60,01	53,99	4857,26
Erzurum	2,71	5,73	21,07	8,09	19,23	4747,89
Gaziantep	19,78	19,35	172,03	21,47	41,27	7307,86
Kayseri	13,14	7,98	60,55	7,84	23,84	3814,61
Konya	8,69	5,06	3,74	42,90	111,30	6113,50
Mersin	27,21	11,92	9,41	99,98	40,48	4789,69
Şanlıurfa	7,23	7,62	21,64	17,83	19,69	5012,24
Trabzon	8,26	0,48	2,56	30,66	16,40	2957,97
Van	4,91	5,82	40,65	23,74	120,95	1818,61

Aynı çalışmada kokain ve MDMA tüketiminin tüm illerde hafta sonlarında arttığı; kokain kullanımının Diyarbakır'da, eroin kullanımının Van ve Konya'da, amfetamin ve metamfetamin kullanımının Gaziantep'te, MDMA kullanımının liman kenti Mersin'de ve kannabis kullanımının ise Adana'da en yüksek düzeyde olduğu belirlenmiştir [11]. Konya'da kentin 12 farklı noktasından alınan atıksu numuneleriyle yürütülen mekânsal değerlendirmede, uyuşturucu kullanımları kokain 0,40–0,62 mg/1000 kişi/gün; amfetamin 92,3–142 mg/1000 kişi/gün; metamfetamin 0,30–0,46 mg/1000 kişi/gün; MDMA 2,74–4,22 mg/1000 kişi/gün; eroin 10–19 mg/1000 kişi/gün; THC (kannabis) 280–430 mg/1000 kişi/gün olduğu; en yüksek tüketimin kannabis ve amfetaminde olduğu; kokain kullanımının hafta içinde, kannabis ve amfetamin kullanımının ise hafta sonunda istatistiksel olarak anlamlı düzeyde arttığı ($p<0,05$) rapor edilmiştir [12]. Bu bulgular, Türkiye'nin de küresel sentetik uyarıcı madde piyasasındaki artış eğilimini yansıttığını ve WBE yaklaşımının ülke içi bölgesel farklılıkları ortaya koymada değerli bir araç olduğunu göstermektedir.

3. ÇEVRESEL RİSK DEĞERLENDİRMESİ VE TARTIŞMA

3.1. Ekotoksikolojik Etkiler

Akuatik ekosistemde uyuşturucu maddeler ve metabolitlerinin konsantrasyonları genellikle ng/L düzeyindedir. Bu miktarlar akut toksisite açısından risk sergilemezken sucul organizmaların yaşam döngüleri boyunca düşük dozda ve kronik olarak bu bileşiklere maruz kalması sublethal etkilere yol açabilmektedir. Literatürde midye, kerevit ve zebra balığı gibi organizmaların uyuşturucu maddeye maruziyeti sonucunda davranışsal (hareketlilik, yüzme örüntüsü gibi) ve fizyolojik etkilere neden olduğu rapor edilmiştir [1]. Bu tür etkiler beslenme, üreme ve predatör kaçınma gibi ekolojik açıdan kritik davranışları etkileyerek popülasyon düzeyinde dolaylı sonuçlara neden olabilmektedir. Ayrıca bazı uyuşturucu maddeler ve metabolitlerinin sucul organizma dokularında biyoakümüle olarak trofik düzeyler arasında transfer olabileceği düşünülecek olursa özellikle insan tüketimine yönelik su ürünleri yetiştiriciliğinin yapıldığı alıcı ortamlarda insanların bu maddelere maruziyeti açısından dikkate alınması gereken bir durumdur. 2005-2022 yılları arasında yayımlanmış 108 çalışmayı kapsayan bir meta-analiz çalışmasında uyuşturucu madde ve metabolitlerinin yüzey sularındaki kirliliğinin sosyo-ekonomik ve çevresel etmenlerle ilişkili olarak küresel ölçekte değişkenlik gösterdiği, en yüksek konsantrasyonların Etiyopya, Avustralya ve Ermenistan’da tespit edildiği ve kirlletici kaynağın genellikle atıksu arıtımının tam giderim sağlayamamasından kaynaklandığı ortaya konulmuştur. Çalışmalarda MDA, THC ve THC-COOH gibi bileşikler en yüksek ekolojik riski sergilemektedir [8].

Konya kentsel AAT’sinde bir yıl boyunca yürütülen izleme çalışmasında, arıtılmış deşarj suyunda tespit edilen THC-COOH’nin *Daphnia magna* ve balıklar için yüksek risk düzeyinde ($RQ > 1$) olduğu; kodein, metadon, THC ve THC-COOH’nin algler üzerinde, metadon ve THC’nin *Daphnia magna* üzerinde, THC’nin ise balıklar üzerinde orta düzeyde risk ($0,1 < RQ < 1$) oluşturduğu belirlenmiştir [13]. Aynı çalışmada, Konya AAT’sinin arıtılmış suyunun Türkiye tuz üretiminin yaklaşık %67’sini karşılayan ve Özel Çevre Koruma Bölgesi statüsündeki Tuz Gölü’ne deşarj edildiği; bu sulak alanın Türkiye’de kayıtlı 485 kuş türünün yarısından fazlasına ev sahipliği yaptığı vurgulanarak, uyuşturucu madde kalıntılarının bu hassas ekosistem için uzun vadeli bir çevresel risk oluşturabileceği bildirilmiştir [13]. Daha önce aynı tesiste yürütülen bir çalışmada ise, MDMA’nın *Daphnia magna* için düşük düzeyde risk oluşturduğu, kümülatif risk katsayılarının ise *Daphnia magna* ve algler için düşük düzeyde kaldığı rapor edilmiştir [12].

Çevresel risk değerlendirmesi çalışmalarında yaygın kullanılan yöntem ölçülen çevresel konsantrasyon (MEC) değerinin tahmin edilen etkisiz konsantrasyon (PNEC) değerine bölünmesiyle elde edilen risk katsayısının ($RQ = MEC/PNEC$) hesaplanmasıdır. RQ değerinin 1’in üzerinde olması, ilgili madde için potansiyel bir ekolojik risk bulunduğuna göstermektedir. Ancak atıksu ve yüzey sularında birden fazla uyuşturucu maddenin ve farklı mikrokirlleticilerin eş zamanlı bulunması nedeniyle bireysel madde bazında yapılan risk değerlendirmeleri gerçek maruziyet senaryosunu tam olarak yansıtmamaktadır. Kümülatif etkiler sinerjistik etki

nedeniyle bireysel madde riskleri toplamından büyük olabileceğinden kümülatif etkilerin de risk değerlendirme çalışmalarında birlikte değerlendirilmesi gereklidir.

3.2. Arıtma Teknolojilerinin Yeterliliği ve Giderim Potansiyeli

Aktif çamur prosesi içeren konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinde uyuşturucu madde ve metabolitlerinin giderimi sınırlıdır. Bu nedenle mevcut tesislerin bu kirleticileri de giderecek şekilde ileri arıtım teknolojileri ile modifiye edilmesi gereklidir. İleri oksidasyon prosesleri (ozonlama, UV/H₂O₂ ve Fenton/foto-Fenton gibi) polar ve biyolojik olarak zor parçalanan organik bileşiklerin moleküler yapısını parçalayarak özellikle biyolojik arıtmaya dirençli kirleticilerin gideriminde yüksek verim sağlayabilmektedir. Ancak proses verimliliği suyun özelliğe bağlı olarak değişmektedir. Özellikle orta-yüksek hidrofobikliğe sahip bileşikler için adsorpsiyon etkili bir fiziksel giderim sunarken, polar uyuşturucu maddeleri için adsorpsiyon kapasitesi sınırlıdır. Nanofiltrasyon ve ters ozmoz gibi membran prosesler moleküler ağırlık ve boyut esasına dayanan fiziksel ayırma mekanizması sayesinde çoğu mikrokirleticiyi büyük ölçüde sudan uzaklaştırabilmektedir. Bu teknolojilerin işletme maliyeti, enerji tüketimi ve olası toksik yan ürün oluşumu gibi kısıtları özellikle büyük ölçekli kentsel AAT’lerde geniş ölçekli uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, ileri arıtma teknolojilerinin AAT’lere entegrasyonu sürecinin su kalitesi hedefleri, alıcı ortamın hassasiyeti ve ekonomik fizibilite analizleri esas alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Konya kentsel AAT’sinde bir yıl boyunca aylık örnekleme ile yürütülen izleme çalışmasında, kokain, amfetamin, metamfetamin, MDA ve THC-COOH için ortalama giderim verimlerinin tüm mevsimlerde %60’ın üzerinde kaldığı; buna karşılık MDMA, kodein ve özellikle morfinin sırasıyla ortalama %40, %40 ve %20’nin altında, oldukça sınırlı giderim verimleri sergilediği belirlenmiştir [13]. Aynı çalışmada, mevsimsel farklılıkların giderim verimleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin bulunmadığı (tek yönlü ANOVA, p>0,05) ortaya konmuş; bu durum, konvansiyonel ikincil arıtmanın yıl boyunca benzer bir performans sergilediğini, ancak hiçbir bileşiğin tam olarak giderilemediğini göstermiştir [13]. Daha önce aynı tesiste yürütülen bir çalışmada ise THC-COOH ve THC-OH için giderim verimliliğinin %100’e ulaştığı, buna karşılık kokain, amfetamin, metamfetamin, MDMA, MDA ve metadon için giderimin %46-87 aralığında değiştiği bildirilmiştir [12]. Bu bulgular, konvansiyonel ikincil arıtmanın bileşik bazında oldukça değişken bir performans sergilediğini ve ileri arıtma teknolojilerine duyulan ihtiyacı somut biçimde desteklemektedir.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Literatür çalışmaları uyuşturucuların kullanım sonrası idrar/feçes yoluyla atılması, doğrudan tualete dökülmesi, kaçak üretim tesislerinden kaynaklanan deşarjlar ve hastane atıksuları gibi çok kaynaklı yollarla AAT’lere ulaştığını ortaya koymaktadır. Konvansiyonel biyolojik arıtma proseslerinin, bu polar ve kısmen kalıcı yapıdaki bileşikler tam olarak gideremediği; bu nedenle uyuşturucu madde kalıntılarının arıtılmış deşarj suyu yoluyla yüzeysel su kaynaklarına ulaşabildiği rapor edilmiştir. Konum itibarıyla yarı-kurak iklim koşullarında bulunan ve son yıllarda iklim değişikliği nedeniyle ülkemizde artan bir su talebi söz konusudur. 2024 yılı verilerine göre, ülkemizde toplam su kullanımının (61,7 milyar m³) yaklaşık %79’u (48,7

milyar m³) tarımsal sulamada tüketilmektedir [9]. Konya Kapalı Havzası'nda ise tüketilen suyun %95,65'i tarımsal sulama amaçlı kullanılmakta, yalnızca %4,1'i içme ve kullanma suyunu ayrılmaktadır [10]. Bu nedenle arıtılmış atıksuyun tarımsal sulama ve yüzeysel su kaynaklarının beslenmesi gibi amaçlarla yeniden kullanımı önemlidir. Bu durum, arıtılmış atıksuda kalan uyuşturucu madde kalıntılarının yalnızca doğal su ekosistemleri için değil, dolaylı yoldan tarımsal ürünler ve su kaynaklarının uzun dönemli kalitesi için de değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca sudaki mikrokirletici kalıntılarının gıda zincirindeki taşınımı ve dolaylı etkilerinin de araştırılması gereklidir.

Bu bağlamda, Konya kentsel AAT'sinde son yıllarda yürütülen kapsamlı izleme çalışmaları [11,12,13], Türkiye'deki bilgi boşluğunun kapatılmasına yönelik önemli adımlar olarak değerlendirilmektedir; ancak bu çalışmaların tek bir tesis ve havza ile sınırlı kalması, bulguların ülke genelinde temsil ediciliğini kısıtlamaktadır. Daglioglu ve ark. [11] tarafından 11 ilde yürütülen çok şehirli çalışma, ülke ölçeğinde bölgesel farklılıkları ortaya koyması bakımından değerli olsa da, tek bir örnekleme dönemine dayanması nedeniyle uzun dönemli eğilimlerin izlenmesine imkân vermemektedir. Bu nedenle, Türkiye'de WBE temelli izleme ağının hem coğrafi hem de zamansal kapsamının genişletilmesi büyük önem taşımaktadır.

Çevresel risk değerlendirmesi açısından, uyuşturucu maddelerin sucul ortamlardaki düşük konsantrasyonlarının akut toksisite bakımından sınırlı bir risk oluşturduğu, ancak kronik ve düşük doz maruziyetin davranışsal ve fizyolojik etkilere yol açabileceğini ortaya çıkmaktadır. Küresel ölçekli meta-analiz çalışmaları, MDA, THC ve THC-COOH gibi bileşiklerin değerlendirilen psikofarmasötik/uyuşturucu maddeler arasında en yüksek ekolojik riski taşıdığını göstermekte; bu bulgu, risk değerlendirme önceliklendirmesinde madde seçiminin yalnızca tespit sıklığına değil, ekotoksikolojik etkinliğe de dayandırılması gerektiğine işaret etmektedir. Tür ve bölgeye özgü PNEC değerlerinin sınırlı sayıda bulunması ve kümülatif etkilerin yeterince değerlendirilmemiş olması, bu alandaki en önemli bilgi boşlukları arasında yer almaktadır.

Arıtma teknolojileri açısından, ileri oksidasyon, aktif karbon adsorpsiyonu ve membran prosesler gibi ileri arıtma seçeneklerinin, konvansiyonel sistemlerin sınırlı performansını telafi etme potansiyeli taşıdığı; ancak yüksek işletme maliyeti, enerji tüketimi ve yan ürün oluşumu gibi kısıtların, bu teknolojilerin büyük ölçekli kentsel AAT'lerde geniş çaplı uygulanabilirliğini sınırladığı görülmektedir. Bu nedenle, ileri arıtma yatırım kararlarının, alıcı ortamın hassasiyeti ve yerel risk düzeyi temelinde önceliklendirilmesi daha rasyonel bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, uyuşturucu maddelerin çevresel risklerinin daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için aşağıda sıralanan hususların önceliklendirilmesi gereklidir. WBE temelli izleme ağlarının, Türkiye'deki büyük ve orta ölçekli şehirleri de düzenli ve sürdürülebilir bir şekilde kapsayacak biçimde genişletilmesi; bu sayede sürekli ve ulusal ölçekte temsil edici bir veri tabanı oluşturulmasını ve yıllar arası karşılaştırmaların güvenilirliğini artıracaktır. Örnekleme ve analiz protokollerinde uluslararası standartlarla uyumlu, ulusal düzeyde ortak bir metodolojinin benimsenmesi farklı kurumlarca üretilen verilerin doğrudan karşılaştırılabilir hale gelmesini sağlayacaktır. Yerel akuatik ekosistemler için tür ve bölgeye özgü ekotoksikolojik verilerin üretilmesi PNEC/RQ temelli risk değerlendirmelerinin sistematik olarak yapılmasını sağlayacaktır. İleri arıtma teknolojilerinin

mevcut AAT'lere entegrasyonunun, özellikle hassas alıcı ortamlara deşarj yapan tesislerde, teknik ve ekonomik fizibilite açısından değerlendirilmesi gereklidir. Bu öneriler doğrultusunda yürütülecek çalışmalar, hem uyuşturucu maddelerin Türkiye'deki çevresel yükünün daha doğru ortaya konmasına hem de WBE yaklaşımının halk sağlığı politikaları ve su kaynakları yönetimi açısından daha etkin kullanılmasına katkı sağlayacaktır. Bu çerçevede üniversiteler, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na bağlı ilgili kurumlar ve belediye AAT işletmecileri arasında kurulacak işbirlikleri hem veri üretiminin hem de elde edilen bulguların politika ve uygulamaya aktarılmasının sürdürülebilirliğini güçlendirecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Krishnan, R.Y., Manikandan, S., Subbaiya, R., Biruntha, M., Balachandar, R., Karmegam, N., Origin, transport and ecological risk assessment of illicit drugs in the environment – A review, *Chemosphere*, 311, 137091, 2023.
- [2] Huizer, M., Ter Laak, T.L., de Voogt, P., van Wezel, A.P., Wastewater-based epidemiology for illicit drugs: A critical review on global data, *Water Research*, 207, 117789, 2021.
- [3] Yi, R., Zeng, T., Chen, J., Liu, D., Yang, X., Zhao, M., Zhou, Z., Wastewater-Based Epidemiology: Assessing Illicit Drug Usage and Impact through an Innovative Approach, *Water*, 15(23), 4192, 2023.
- [4] Zarei, S., Salimi, Y., Repo, E., Daglioglu, N., Safaei, Z., Güzel, E., Asadi, A., A global systematic review and meta-analysis on illicit drug consumption rate through wastewater-based epidemiology, *Environmental Science and Pollution Research*, 27(29), 36037-36051, 2020.
- [5] Erdoğan, N., Eren, Z., Seçili Antidepresan Bileşiklerin Atıksu Arıtma Tesislerinde Tespiti, İzlenmesi ve Arıtılabilirliğinin İncelenmesi: Erzurum Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Örneği, *Environmental Toxicology and Ecology*, 3(2), 104-118, 2023.
- [6] European Union Drugs Agency (EUDA), Latest wastewater data from 128 European cities: more stimulants but less cannabis found, https://www.euda.europa.eu/news/2025/latest-wastewater-data-128-european-cities-more-stimulants-less-cannabis-found_en, 2025 (Erişim tarihi: 24.06.2026).
- [7] European Union Drugs Agency (EUDA), Europe's wastewater tells a new story: sharp drop in MDMA, but ketamine and cocaine climb, https://www.euda.europa.eu/news/2026/europes-wastewater-tells-new-story-sharp-drop-mdma-ketamine-and-cocaine-climb_en, 2026 (Erişim tarihi: 24.06.2026).
- [8] Zhang, Y., Guo, C., Wu, R., Hou, S., Liu, Y., Zhao, J., Jiang, M., Xu, J., Wu, F., Global occurrence, distribution, and ecological risk assessment of psychopharmaceuticals and illicit drugs in surface water environment: A meta-analysis, *Water Research*, 263, 122165, 2024.
- [9] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevresel Göstergeler – Su Kullanımı (DSİ 2024 verilerine atfen), <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/su-kullanimi-i-85738>, 2024 (Erişim tarihi: 30.06.2026).

- [10]** T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Konya Kapalı Havzası Sektörel Su Tahsis Planı, 2018.
- [11]** Daglioglu, N., Yavuz Guzel, E., Atasoy, A., Gören, İ.E., Comparison of community illicit drug use in 11 cities of Turkey through wastewater-based epidemiology, *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 15076-15089, 2021.
- [12]** Aydın, S., Ulvi, A., Aydın, M.E., Monitoring and ecological risk of illegal drugs before and after sewage treatment in an area, *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 294, 2022.
- [13]** Aydın, S., Ulvi, A., Aydın, M.E., Illicit drugs and therapeutic opioids in urban wastewater: Occurrence, consumption estimates, removal and ecotoxicological implications, *Environmental Pollution*, 402, 128363, 2026.

**EXPLAINABLE MACHINE LEARNING FOR CORONARY HEART DISEASE
CLASSIFICATION: A NESTED CROSS-VALIDATION STUDY ON THE
CLEVELAND DATASET WITH CONSENSUS FEATURE SELECTION AND SHAP
INTERPRETATION**

Doç. Dr. Şeyma YAŞAR

İnönü Üniversitesi

seyma.yasar@inonu.edu.tr - 0000-0003-1300-3393

Abstract

Coronary heart disease (CHD) remains the leading cause of death worldwide, highlighting the need for reliable, interpretable decision-support tools for early risk stratification. This study developed and internally validated an explainable machine-learning framework for CHD classification using the public UCI Cleveland dataset. After removal of one duplicate record, 302 patients, including 138 with CHD (45.7%), and 13 clinical features were analysed. Fourteen classifiers were benchmarked using a stratified nested cross-validation design comprising 5 outer folds repeated twice and 3 inner folds for hyperparameter tuning. All preprocessing steps were fitted exclusively within the training folds to prevent data leakage. Feature relevance was assessed using an eight-method consensus voting approach, and the best-performing model was interpreted with SHAP. Model discrimination, calibration and clinical utility were reported with 95% confidence intervals. The Extra-Trees classifier demonstrated the highest discrimination, with an AUROC of 0.917 (95% CI: 0.887-0.948), accuracy of 0.849, F1 score of 0.823, MCC of 0.699, sensitivity of 0.786 and specificity of 0.903. Eight of the fourteen models achieved AUROC values above 0.89, suggesting that the dataset represents a well-separated classification problem. Consensus feature selection and SHAP analyses showed concordant findings, identifying chest-pain type, ST depression, number of major vessels, thalassemia status, maximum heart rate and exercise-induced angina as the most influential predictors. Overall, this transparent nested cross-validation pipeline provided strong and well-calibrated CHD classification while revealing clinically coherent predictors. In addition, the study documents and corrects a widely propagated label-encoding error in the commonly used Cleveland CSV file, emphasizing the importance of provenance checks in reproducible medical machine-learning research.

Keywords: coronary heart disease; machine learning; explainable AI; SHAP; nested cross-validation; feature selection

1. Introduction

Cardiovascular disease is the foremost contributor to global mortality, and coronary heart disease (CHD) accounts for the largest share of this burden [1]. Because clinical presentation is heterogeneous and invasive confirmation such as coronary angiography is costly and carries risk, non-invasive risk stratification from routinely collected variables has long attracted attention. Machine-learning (ML) classifiers can integrate demographic, symptomatic, electrocardiographic and exercise-test variables to estimate the probability of disease, and have repeatedly outperformed single-variable thresholds on benchmark cohorts [2,3].

The UCI Cleveland Heart Disease dataset, first analysed by Detrano and colleagues [2], is among the most frequently used benchmarks in clinical ML. Despite its popularity, three recurring methodological weaknesses limit the reliability of many published results. First, hyper-parameters are frequently tuned on the same folds used for performance estimation, producing optimistically biased estimates [4]. Second, feature preprocessing (scaling, imputation, resampling) is often fitted on the whole dataset before cross-validation, leaking test information into training. Third, a widely circulated CSV version of the dataset carries an inverted target label, which- if used uncritically- silently reverses the clinical meaning of every reported association.

In parallel, the clinical community increasingly requires that predictions be not only accurate but also explainable. Opaque models impede clinical trust, complicate error auditing, and are difficult to reconcile with emerging reporting and regulatory expectations [5,6]. Post-hoc attribution methods such as SHAP [7] and intrinsic feature-relevance analyses can expose which variables drive a model and whether those variables are clinically plausible.

In this study we build a transparent, leakage-controlled classification pipeline for CHD on the Cleveland cohort. Our contributions are threefold: (i) a rigorous nested cross-validation benchmark of 14 classifiers reported with confidence intervals; (ii) an eight-method consensus feature-selection scheme cross-validated against SHAP attributions; and (iii) explicit documentation and correction of the inverted-label issue in the public CSV, with a reproducible analysis script.

2. Materials and Methods

2.1 Dataset in study

The analysis used the public UCI Cleveland Heart Disease dataset comprising 303 patient records with 13 clinical attributes: age, sex, chest-pain type (cp), resting blood pressure (trestbps), serum cholesterol (chol), fasting blood sugar (fbs), resting electrocardiographic results (restecg), maximum heart rate achieved (thalach), exercise-induced angina (exang), ST depression (oldpeak), the slope of the peak exercise ST segment (slope), number of major vessels coloured by fluoroscopy (ca) and thalassemia status (thal). One exact duplicate record was removed, leaving 302 patients.

2.2 Preprocessing

Five continuous variables (age, trestbps, chol, thalach, oldpeak) were standardised (zero mean, unit variance); the remaining categorical/ordinal variables were passed through unchanged. Crucially, the standardiser was fitted only on the training partition within each cross-validation fold and then applied to the held-out partition, so that no test-fold statistics influenced training.

2.3 Model panel

Fourteen classifiers spanning linear, kernel, instance-based, probabilistic, neural and tree-ensemble families were evaluated: logistic regression (with L2 and L1 penalties), linear and radial-basis support-vector machines, k-nearest neighbours, Gaussian and Bernoulli naïve Bayes, a multilayer perceptron, a decision tree, random forest, extremely randomised trees (Extra-Trees) [8], gradient boosting, AdaBoost and XGBoost [9]. All models were implemented in scikit-learn [10] and XGBoost with fixed random seeds.

2.4 Nested cross-validation

Performance was estimated with stratified nested cross-validation. The outer loop (5 folds, repeated twice; 10 held-out evaluations in total) provided unbiased performance estimates, while an inner 3-fold loop performed grid-search hyper-parameter tuning optimised for the area under the receiver-operating-characteristic curve (AUROC). This separation ensures that model selection never sees the data on which the model is scored, avoiding the optimistic bias that arises from flat cross-validation [4,11].

2.5 Consensus feature selection

Feature relevance was assessed with eight complementary methods: mutual information, the ANOVA F-statistic, random-forest and Extra-Trees impurity importance, L1-regularised (LASSO) logistic-regression coefficients, recursive feature elimination, permutation importance, and XGBoost gain. For each method the eight highest-ranked variables were considered “selected”; a variable receiving at least four of eight votes was designated a strong-consensus predictor [3,12,13].

2.6 Explainability

The best-performing model was interpreted with SHAP (SHapley Additive exPlanations) [7], a game-theoretic attribution method that assigns each feature a locally accurate, additive contribution to every prediction. Global importance was summarised as the mean absolute SHAP value per feature, and the direction of effects was visualised with a beeswarm summary plot. Concordance between SHAP rankings and the consensus votes was examined as an internal consistency check.

2.7 Evaluation metrics

For every outer fold we recorded AUROC, accuracy, F1-score, the Matthews correlation coefficient (MCC) [14], sensitivity, specificity and the Brier score. Point estimates and 95% confidence intervals were computed across the ten outer-fold results. Calibration was assessed with reliability curves and clinical separability with a confusion matrix, both obtained from cross-validated predictions.

3. Results

3.1 Cohort characteristics

Table 1 summarises the cohort by disease status. Patients with CHD were older, more frequently male, and- consistent with ischaemic physiology- reached a lower maximum heart rate while exhibiting greater ST depression, more diseased vessels and markedly more exercise-induced angina than controls.

Table 1. Cohort characteristics by disease status.

Characteristic	Disease (n = 138)	No disease (n = 164)
Age, years	56.6 ± 8.0	52.6 ± 9.5
Male sex	82.6%	56.1%
Resting BP, mmHg	134.4 ± 18.7	129.2 ± 16.2
Cholesterol, mg/dL	251.1 ± 49.5	242.6 ± 53.5
Max heart rate, bpm	139.1 ± 22.6	158.4 ± 19.2
ST depression (oldpeak)	1.6 ± 1.3	0.6 ± 0.8
Major vessels (ca)	1.2 ± 1.0	0.3 ± 0.8
Exercise-induced angina	55.1%	14.0%
Fasting blood sugar >120	15.9%	14.0%

Continuous variables are mean ± standard deviation; categorical variables are percentages.

3.2 Model comparison

Table 2 reports the nested cross-validation results for all 14 classifiers, ranked by AUROC. The Extra-Trees ensemble achieved the best discrimination (AUROC 0.917, 95% CI 0.887–0.948), followed closely by random forest and the boosting ensembles. Notably, eight models exceeded an AUROC of 0.89, and the well-regularised logistic regression remained highly competitive (AUROC 0.899) while offering the best specificity (0.912)- a reminder that simple, interpretable baselines should not be dismissed on this cohort [15]. Extra-Trees also produced the lowest Brier score among the top models, indicating good probability calibration.

Table 2. Nested cross-validation performance (10 outer-fold evaluations)

Model	AUROC (95% CI)	Acc	F1	MCC	Sens	Spec	Brier
ExtraTrees	0.917 (0.887–0.948)	0.849	0.823	0.699	0.786	0.903	0.122
Random Forest	0.910 (0.882–0.938)	0.831	0.802	0.661	0.760	0.890	0.124
AdaBoost	0.902 (0.877–0.927)	0.831	0.807	0.663	0.782	0.872	0.175
Gradient Boosting	0.900 (0.875–0.926)	0.821	0.794	0.641	0.760	0.872	0.130
SVM (linear)	0.900 (0.867–0.932)	0.829	0.796	0.659	0.739	0.906	0.125
Logistic Regression	0.899 (0.868–0.931)	0.836	0.804	0.674	0.746	0.912	0.127
Bernoulli NB	0.896 (0.879–0.914)	0.815	0.789	0.629	0.772	0.851	0.135
Logistic Reg. (L1)	0.895 (0.863–0.927)	0.831	0.800	0.663	0.746	0.903	0.129
SVM (RBF)	0.894 (0.860–0.927)	0.823	0.791	0.645	0.739	0.893	0.130
XGBoost	0.892 (0.865–0.920)	0.811	0.787	0.621	0.764	0.851	0.141
Gaussian NB	0.892 (0.863–0.920)	0.811	0.784	0.624	0.775	0.842	0.144
k-Nearest Neighbours	0.870 (0.832–0.907)	0.803	0.759	0.607	0.688	0.899	0.146

MLP (neural net)	0.849 (0.817–0.881)	0.786	0.756	0.570	0.732	0.833	0.177
Decision Tree	0.839 (0.808–0.869)	0.793	0.761	0.585	0.721	0.854	0.161

Acc = accuracy; MCC = Matthews correlation coefficient; Sens = sensitivity; Spec = specificity. Best value per column in the top rows.

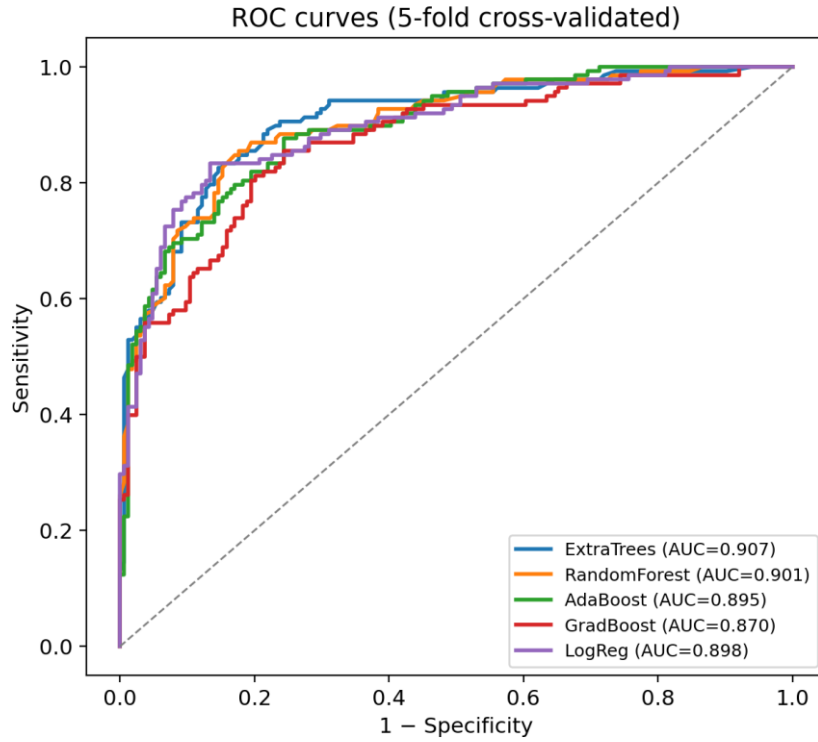


Figure 1. Cross-validated ROC curves for the five best classifiers. The tree ensembles dominate the operating range.

3.3 Consensus feature selection

Table 3 lists the eight-method voting result alongside global SHAP importance. Six variables — chest-pain type, ST depression, number of major vessels, thalassemia status, maximum heart rate and exercise-induced angina- received near-unanimous support, and nine variables reached the strong-consensus threshold ($\geq 4/8$ votes). Resting blood pressure, fasting blood sugar and resting ECG were consistently uninformative, mirroring their weak univariate associations.

Table 3. Eight-method consensus feature-selection votes and global SHAP importance. Features are ordered by consensus strength.

Feature	Consensus votes	Mean SHAP
Chest pain type (cp)	8 / 8	0.094
ST depression (oldpeak)	8 / 8	0.050
Thalassemia (thal)	8 / 8	0.081
Major vessels (ca)	7 / 8	0.099
Max heart rate (thalach)	7 / 8	0.037
Exercise angina (exang)	6 / 8	0.078
ST slope (slope)	6 / 8	0.061

Sex	5 / 8	0.070
Age	4 / 8	0.028
Cholesterol (chol)	3 / 8	0.021
Resting BP (trestbps)	1 / 8	0.017
Fasting blood sugar (fbs)	1 / 8	0.006
Resting ECG (restecg)	0 / 8	0.004

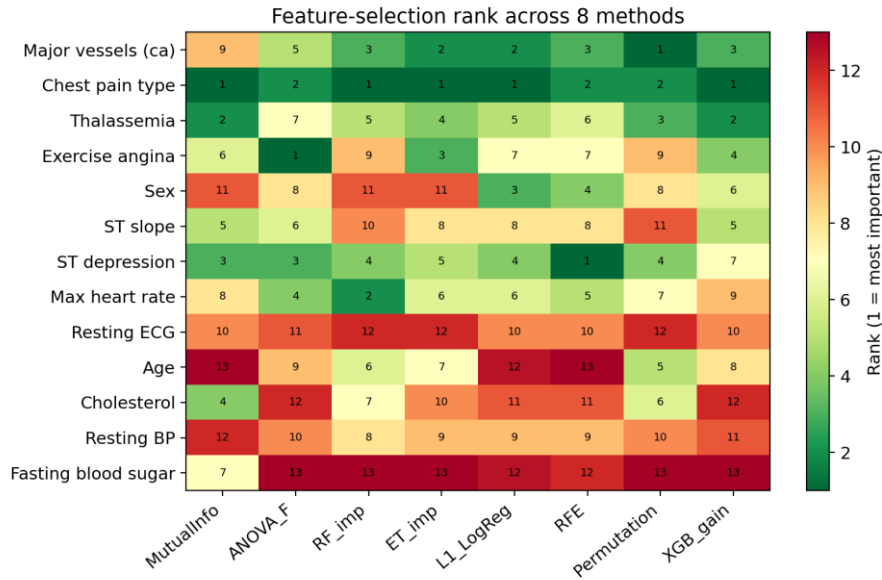


Figure 2. Rank of each feature across the eight selection methods (1 = most important). Agreement is high for the top predictors.

3.4 Model explanation with SHAP

SHAP attributions for the Extra-Trees model (Figure 3) were highly concordant with the consensus votes. A greater number of diseased vessels, atypical chest-pain type, abnormal thalassemia status, the presence of exercise-induced angina, higher ST depression and lower maximum heart rate all pushed predictions towards disease - directions that agree with established cardiological knowledge. This concordance between an intrinsic voting scheme and a post-hoc game-theoretic method strengthens confidence that the model relies on clinically meaningful signal rather than dataset artefacts.

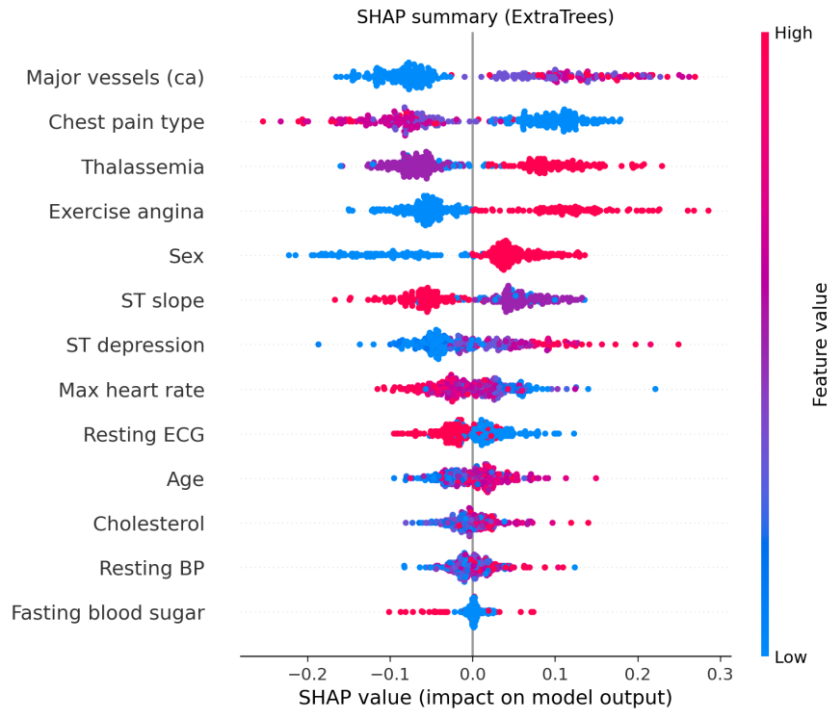


Figure 3. SHAP beeswarm summary for the Extra-Trees model. Each point is a patient; colour encodes the (standardised) feature value and horizontal position the contribution to the disease prediction.

3.5 Calibration and classification

Figure 4 shows the reliability curve and confusion matrix for the Extra-Trees model obtained from cross-validated predictions. Predicted probabilities tracked observed frequencies reasonably well across the probability range, and at the default 0.5 threshold the model correctly classified the majority of both cases and controls, consistent with the sensitivity (0.786) and specificity (0.903) reported in Table 2.

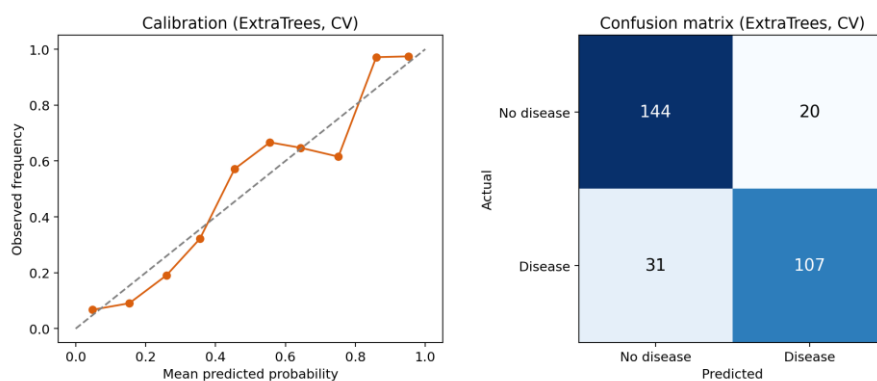


Figure 4. Calibration curve (left) and confusion matrix (right) for the Extra-Trees classifier from cross-validated predictions.

4. Discussion

This study presents a transparent, leakage-controlled machine-learning pipeline for coronary heart disease classification on the Cleveland cohort. The best model, an Extra-Trees ensemble, reached an AUROC of 0.917 with strong specificity and good calibration, and the eight of

fourteen classifiers clustered above 0.89 AUROC indicate that the problem is well separated by the available features. Importantly, the predictors identified by an eight-method consensus scheme and by SHAP were mutually consistent and clinically coherent, centring on chest-pain type, ST depression, diseased-vessel count, thalassemia status, maximum heart rate and exercise-induced angina.

Two methodological points deserve emphasis. First, the near-parity between the tree ensembles and a regularised logistic regression echoes a broader message in high-stakes clinical modelling: when a transparent model performs comparably, its interpretability is a decisive advantage, and elaborate black boxes should not be adopted by default [15]. Second, our explicit correction of the inverted target label in the popular CSV is not a technicality. Because the inversion reverses the sign of every association, uncorrected analyses can report clinically nonsensical directions of effect while still achieving high accuracy—a failure that only surfaces when explanations are examined against domain knowledge. This illustrates a practical benefit of routine explainability: it functions as a data-provenance audit, not merely a communication aid [6].

Our design also mitigates the optimistic bias that pervades benchmark studies. By confining hyper-parameter search to an inner loop and fitting all scaling inside training folds, the reported estimates approximate genuine out-of-sample behaviour more faithfully than flat cross-validation [4,11]. Reporting confidence intervals, calibration and clinical-utility-relevant metrics rather than accuracy alone further aligns the study with contemporary reporting standards for clinical prediction models [5,16].

Several limitations temper these findings. The Cleveland cohort is small (302 patients), single-centre and decades old; absolute performance should not be extrapolated to contemporary populations without external validation on independent, prospectively collected data. The public CSV has also been pre-cleaned, so our results do not reflect the missing-data handling that a real deployment would require. Finally, SHAP attributions describe associational, not causal, structure; they should guide hypothesis generation and model auditing rather than direct clinical intervention.

5. Conclusion

A rigorously validated, explainable machine-learning pipeline classified coronary heart disease on the Cleveland cohort with high discrimination and good calibration, while surfacing clinically plausible predictors through concordant consensus and SHAP analyses. Beyond the specific results, the study highlights two transferable lessons for reproducible medical machine learning: interpretable baselines remain competitive and should be reported alongside complex models, and explainability doubles as a safeguard against silent data errors such as the inverted label documented here. Future work should validate the pipeline on external cohorts and integrate distribution-free uncertainty quantification to support trustworthy deployment [17].

6. References

1. Roth GA, Mensah GA, Johnson CO, Addolorato G, Ammirati E, Baddour LM, et al. Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019. *J Am Coll Cardiol.* 2020;76(25):2982–3021.

2. Detrano R, Jánosi A, Steinbrunn W, Pfisterer M, Schmid JJ, Sandhu S, et al. International application of a new probability algorithm for the diagnosis of coronary artery disease. *Am J Cardiol.* 1989;64(5):304–10.
3. Shilaskar S, Ghatol A. Feature selection for medical diagnosis: evaluation for cardiovascular diseases. *Expert Syst Appl.* 2013;40(10):4146–53.
4. Cawley GC, Talbot NLC. On over-fitting in model selection and subsequent selection bias in performance evaluation. *J Mach Learn Res.* 2010;11:2079–107.
5. Collins GS, Moons KGM, Dhiman P, Riley RD, Beam AL, Van Calster B, et al. TRIPOD+AI statement: updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods. *BMJ.* 2024;385:e078378.
6. Amann J, Blasimme A, Vayena E, Frey D, Madai VI. Explainability for artificial intelligence in healthcare: a multidisciplinary perspective. *BMC Med Inform Decis Mak.* 2020;20(1):310.
7. Lundberg SM, Lee SI. A unified approach to interpreting model predictions. In: *Advances in Neural Information Processing Systems* 30. 2017. p. 4765–74.
8. Geurts P, Ernst D, Wehenkel L. Extremely randomized trees. *Mach Learn.* 2006;63(1):3–42.
9. Chen T, Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system. In: *Proc. 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining.* 2016. p. 785–94.
10. Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, et al. Scikit-learn: machine learning in Python. *J Mach Learn Res.* 2011;12:2825–30.
11. Vabalas A, Gowen E, Poliakoff E, Casson AJ. Machine learning algorithm validation with a limited sample size. *PLoS One.* 2019;14(11):e0224365.
12. Guyon I, Elisseeff A. An introduction to variable and feature selection. *J Mach Learn Res.* 2003;3:1157–82.
13. Kursa MB, Rudnicki WR. Feature selection with the Boruta package. *J Stat Softw.* 2010;36(11):1–13.
14. Chicco D, Jurman G. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC Genomics.* 2020;21(1):6.
15. Rudin C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nat Mach Intell.* 2019;1(5):206–15.
16. Van Calster B, McLernon DJ, van Smeden M, Wynants L, Steyerberg EW. Calibration: the Achilles heel of predictive analytics. *BMC Med.* 2019;17(1):230.
17. Angelopoulos AN, Bates S. A gentle introduction to conformal prediction and distribution-free uncertainty quantification. *arXiv:2107.07511.* 2021.
18. Breiman L. Random forests. *Mach Learn.* 2001;45(1):5–32.
19. Ribeiro MT, Singh S, Guestrin C. “Why should I trust you?” Explaining the predictions of any classifier. In: *Proc. 22nd ACM SIGKDD.* 2016. p. 1135–44.

20. Vickers AJ, Elkin EB. Decision curve analysis: a novel method for evaluating prediction models. *Med Decis Making*. 2006;26(6):565–74.
21. Chawla NV, Bowyer KW, Hall LO, Kegelmeyer WP. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *J Artif Intell Res*. 2002;16:321–57.
22. Molnar C. *Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable*. 2nd ed. 2022.

HANDLING CLASS IMBALANCE IN MEDICAL MACHINE LEARNING: A NARRATIVE REVIEW OF RESAMPLING, ALGORITHMIC, AND EVALUATION STRATEGIES

Doç. Dr. Şeyma YAŞAR

İnönü Üniversitesi

seyma.yasar@inonu.edu.tr - 0000-0003-1300-3393

Abstract

Class imbalance-where the clinically important outcome is far rarer than its alternative-is the rule rather than the exception in medical machine learning: rare diseases, adverse drug events, treatment failures and malignancies all yield skewed datasets. Standard learners trained to minimise overall error tend to favour the majority class, producing deceptively high accuracy while missing the very cases that matter. This narrative review synthesises the methods developed to address imbalance and, critically, the evidence on when they help and when they harm. We organise strategies into three families: data-level resampling (random over- and under-sampling; the SMOTE family, including Borderline-SMOTE, ADASYN, K-Means-SMOTE and SMOTE-NC; undersampling refinements such as Tomek links and edited nearest neighbours; and hybrids); algorithm-level methods (cost-sensitive learning, decision-threshold tuning, balanced ensembles such as Balanced Random Forest, EasyEnsemble and RUSBoost, and imbalance-aware deep-learning losses); and generative augmentation. We then address evaluation, arguing that accuracy and even AUROC can mislead under strong imbalance and that precision–recall analysis, the Matthews correlation coefficient, G-mean and calibration should be reported instead. Using an illustrative experiment, we show that resampling can improve minority-class recall while simultaneously degrading precision-recall performance and probability calibration- a trade-off increasingly emphasised in the recent literature. We close with practical recommendations, foremost among them that resampling must be performed inside cross-validation folds to avoid optimistic bias, and that probability calibration should be checked whenever imbalance corrections are applied.

Keywords: class imbalance; SMOTE; resampling; cost-sensitive learning; medical machine learning; model evaluation

1. Introduction

Many of the most consequential prediction targets in medicine are rare. Malignancy among screened lesions, mortality after a procedure, sepsis on a general ward, or failure of a first-line therapy may each occur in only a small percentage of patients. In machine-learning terms these are class-imbalanced problems, characterised by a large imbalance ratio (IR) between the majority (typically “no event”) and minority (the clinically important “event”) classes [1,2,3]. Because most classifiers are trained to minimise overall error, they are implicitly biased toward the majority: a model can attain 95% accuracy on a 5% prevalence problem simply by predicting “no event” for everyone, while being clinically useless. This well-known failure is the accuracy paradox, and it makes imbalance both a modelling and an evaluation challenge [4,5].

The difficulty is not caused by skewed prevalence alone. Empirically, imbalance harms learning most when it coincides with small absolute minority sample size, with class overlap, and with “small disjuncts” - sparse sub-clusters of the minority that the learner treats as noise [1,6]. A rare outcome that is nonetheless cleanly separable may be learned well; a rare outcome buried within an overlapping majority is far harder. Recognising these interacting factors is important because different remedies target different causes.

Over two decades, a large toolbox has accumulated: resampling the data, re-weighting the loss, restructuring ensembles, and generating synthetic examples. This review organises these approaches, illustrates their behaviour, and- reflecting a maturing and more sceptical literature - emphasises that imbalance corrections are not automatically beneficial and can distort probability estimates that clinicians rely upon [7]. Our aim is a practical, evidence-aware guide for researchers building medical classifiers on skewed data. Figure 1 summarises the strategy landscape.

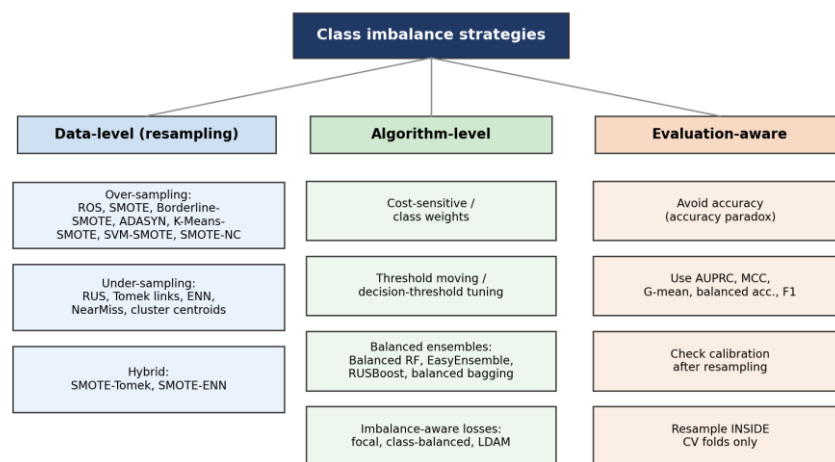


Figure 1. The landscape of class-imbalance strategies, grouped into data-level, algorithm-level and evaluation-aware approaches.

2. The nature of class imbalance

Imbalance can be intrinsic to the domain (rare disease) or extrinsic (a sampling artefact), and it may be relative (minority merely smaller) or absolute (minority also scarce in absolute count).

Beyond the global IR, three data characteristics govern difficulty. Class overlap describes regions where minority and majority distributions intermingle, blurring the decision boundary. Within-class imbalance and small disjuncts arise when the minority itself comprises several sparse sub-concepts. Finally, noisy or borderline instances disproportionately affect a small class. A key practical implication is that remedies which simply equalise class counts do not address overlap or small disjuncts, and may even worsen them by amplifying noisy minority points [6,8].

3. Data-level methods: resampling

Data-level methods rebalance the training set before or during learning and are attractive because they are model-agnostic. The canonical over-sampling method, SMOTE, creates synthetic minority instances by interpolating between a minority point and its nearest minority neighbours, thereby enlarging the minority region rather than merely duplicating points [9]. Figure 2 illustrates the effect on a two-dimensional example. A large family of refinements followed: Borderline-SMOTE concentrates synthesis near the decision boundary [10]; ADASYN adapts the number of synthetic points to local learning difficulty [11]; K-Means-SMOTE first clusters to avoid seeding noise [8]; SVM-SMOTE uses support vectors to guide placement [12]; and SMOTE-NC extends interpolation to mixed nominal-and-continuous clinical features [9]. Undersampling offers the complementary route: random undersampling is fast but discards data, while informed variants- Tomek links [13], edited nearest neighbours [14] and NearMiss [15]- remove redundant, noisy or overlapping majority points. Hybrids such as SMOTE-Tomek and SMOTE-ENN over-sample and then clean the boundary [16]. Table 1 summarises these methods.

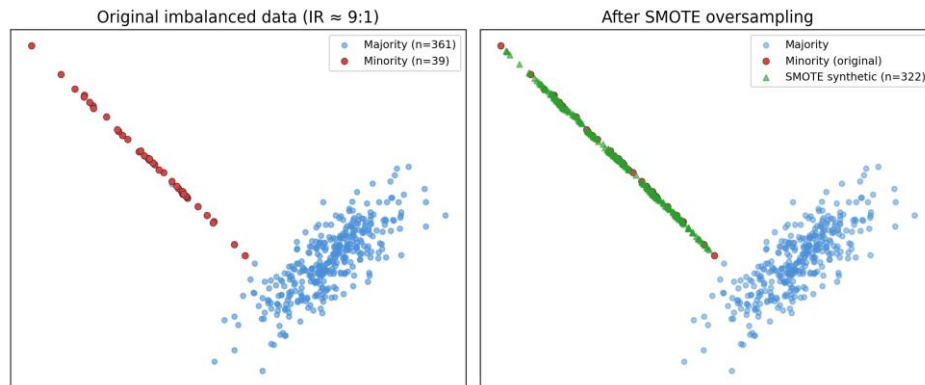


Figure 2. SMOTE illustrated on a synthetic 90:10 problem. Left: original minority points are sparse. Right: SMOTE fills the minority region with interpolated synthetic examples (green triangles).

Table 1. Representative resampling methods for class-imbalanced learning.

Method	Family	Mechanism	Practical note
Random over-sampling (ROS)	Over	Duplicates minority instances at random.	Simple; risk of over-fitting exact copies.
SMOTE	Over	Interpolates new minority points between nearest neighbours.	Reduces over-fitting; may blur class overlap.
Borderline-SMOTE	Over	Synthesises only near the decision border.	Focuses on hard region; sensitive to noise.

ADASYN	Over	Generates more samples where minority is harder to learn.	Adaptive density; can amplify outliers.
K-Means-SMOTE	Over	Clusters first, then over-samples safe clusters.	Mitigates noise/within-class imbalance.
SVM-SMOTE	Over	Uses SVM support vectors to place synthetic points.	Border-focused; costlier.
SMOTE-NC	Over	SMOTE variant handling nominal + continuous features.	Needed for mixed clinical data.
Random under-sampling (RUS)	Under	Removes majority instances at random.	Fast; discards potentially useful data.
Tomek links	Under	Removes borderline/overlapping majority points.	Cleans boundary; small effect alone.
Edited Nearest Neighbours (ENN)	Under	Removes majority points misclassified by kNN.	Noise cleaning.
NearMiss	Under	Selects majority points closest to the minority.	Retains informative majority.
SMOTE-Tomek / SMOTE-ENN	Hybrid	Over-sample then clean the boundary.	Balanced + de-noised sets.

4. Algorithm-level methods

Rather than changing the data, algorithm-level methods change the learner's objective or structure. Cost-sensitive learning assigns a higher misclassification cost to the minority class, most simply via class weights inversely proportional to prevalence [17]. Threshold moving is a closely related and often overlooked lever: because most classifiers output probabilities, the operating threshold can be optimised on the training data for a clinically appropriate sensitivity–specificity balance without touching the data distribution. Ensemble methods purpose-built for imbalance combine resampling with bagging or boosting: Balanced Random Forest draws balanced bootstrap samples per tree [18]; EasyEnsemble and BalanceCascade build ensembles over multiple undersampled subsets to avoid discarding information [19]; and RUSBoost integrates random undersampling into boosting [20], as SMOTEBoost does with synthesis [21]. In deep learning, imbalance-aware loss functions - focal loss, which down-weights easy majority examples [22]; class-balanced loss based on the effective number of samples [23]; and label-distribution-aware margin (LDAM) loss [24] - have become standard for skewed image and signal datasets [25,26].

5. Generative augmentation

A newer strand replaces interpolation with learned generation. Generative adversarial networks [27] and variational autoencoders synthesise minority-class examples that, in principle, respect the true data manifold better than linear interpolation. In medical imaging, GAN-based augmentation has improved minority-class detection in tasks such as liver-lesion classification [28]. The promise is higher-fidelity minority samples; the risks are training instability, mode collapse, and the generation of unrealistic or subtly leaked examples. As with SMOTE, synthetic data must never be allowed to cross from training into evaluation folds.

6. Evaluation under imbalance

Choosing the right metric is as important as choosing the right method. Accuracy is actively misleading under imbalance, and AUROC, though threshold-free, can appear reassuringly high because the large number of true negatives dominates the false-positive rate [4]. Precision–recall analysis (AUPRC / average precision) is more informative when positives are rare, since it foregrounds performance on the minority class [5]. Single-number summaries that account for all confusion-matrix cells - the Matthews correlation coefficient - and metrics that reward both classes - balanced accuracy and the geometric mean of class recalls (G-mean) - are preferable to accuracy or the F1-score, which ignores true negatives [29]. Table 2 summarises these choices. Crucially, resampling distorts the base rate and therefore the meaning of the predicted probabilities; models trained on artificially balanced data are typically miscalibrated on the true prevalence and require recalibration before probabilistic outputs are trusted [7].

Table 2. Evaluation metrics for imbalanced classification and their behaviour under skew.

Metric	Measures	Relevance under imbalance
Accuracy	Overall correct fraction	Misleading under imbalance (accuracy paradox).
AUROC	Ranking across all thresholds	Threshold-free but optimistic under strong imbalance.
AUPRC / average precision	Precision–recall trade-off	More informative than AUROC when positives are rare.
Sensitivity / recall	Coverage of the minority class	Directly reflects missed cases.
Balanced accuracy / G-mean	Mean/geom. mean of class recalls	Rewards performance on both classes.
F1-score	Harmonic mean of precision & recall	Ignores true negatives; threshold-dependent.
MCC	Correlation of predictions and truth	Balanced single number; robust under imbalance.
Calibration (Brier, curves)	Reliability of probabilities	Distorted by resampling; often needs recalibration.

6.1 An illustrative comparison

To make these trade-offs concrete, Table 3 reports a five-fold cross-validated comparison on a synthetic 15:1 imbalanced dataset (2,000 samples, 6.5% minority) using logistic regression as the base learner, with all resampling performed strictly inside the training folds. Two lessons emerge. First, the untreated baseline attains the highest accuracy (0.965) yet the poorest G-mean (0.708), the signature of the accuracy paradox. Second, resampling and cost-sensitive learning substantially raise minority-oriented metrics such as G-mean (to ~0.83) but, in this setting, reduce precision-recall performance (AUPRC falls from 0.72 to ~0.59) and the MCC. The balanced ensemble offered the best overall compromise. This pattern - improved recall at the cost of precision and calibration - is consistent with recent cautionary evidence that imbalance corrections can harm risk-prediction models rather than help them [7], and it underscores that method choice must follow the clinical objective (case-finding versus calibrated risk).

Table 3. Illustrative five-fold cross-validated comparison on a synthetic 15:1 imbalanced dataset (resampling applied inside folds). Higher is better for all columns; note the divergence between accuracy and minority-oriented metrics.

Strategy	Acc	AUROC	AUPRC	G-mean	MCC	F1
None (baseline)	0.965	0.890	0.717	0.708	0.664	0.649
Class weight	0.852	0.907	0.589	0.825	0.413	0.410
Random over-sampling	0.855	0.907	0.594	0.834	0.424	0.418
SMOTE	0.855	0.898	0.590	0.831	0.421	0.417
ADASYN	0.847	0.901	0.567	0.827	0.409	0.404
SMOTE-Tomek	0.855	0.898	0.590	0.831	0.421	0.417
SMOTE-ENN	0.794	0.898	0.536	0.806	0.350	0.340
Balanced RF	0.923	0.910	0.672	0.821	0.525	0.545

7. Pitfalls and recommendations

Several errors recur in applied medical studies. The most damaging is resampling before cross-validation: if SMOTE or oversampling is applied to the whole dataset and the data are then split, synthetic points derived from test cases leak into training, inflating performance dramatically and irreproducibly. Resampling must be embedded inside the cross-validation pipeline so that it sees only training folds [30,31]. A second pitfall is applying SMOTE in high-dimensional settings, where nearest-neighbour interpolation degrades and can fail to help or even hurt [32]. A third is reporting only accuracy or AUROC; per-class metrics, AUPRC and MCC should accompany them, together with the imbalance ratio itself. A fourth is ignoring calibration after balancing, which silently breaks any downstream decision that depends on absolute risk [7].

Accordingly, we recommend the following pragmatic workflow. Begin by asking whether imbalance actually harms the chosen metric before intervening; for well-separated problems, no correction may be needed. Prefer cost-sensitive learning and threshold tuning as first-line, minimally disruptive options, since they leave the data distribution — and thus calibration — intact. If resampling is used, embed it inside cross-validation, favour informed variants suited to the data type (e.g., SMOTE-NC for mixed features, K-Means-SMOTE for noisy data), and compare several methods rather than trusting one [33]. Report the imbalance ratio, precision-recall performance, MCC and calibration, and recalibrate probabilities when balancing has been applied. Finally, treat balanced ensembles as strong, convenient baselines.

8. Conclusion

Class imbalance is intrinsic to medical machine learning, and a rich toolbox of resampling, cost-sensitive, ensemble and generative methods now exists to address it. Yet the central message of the current literature is one of measured pragmatism: these corrections are not free. They can convert a deceptively accurate but useless model into a more sensitive one, but they can also degrade ranking performance and, importantly, distort the calibrated probabilities on which clinical risk communication depends. The responsible path is to match the remedy to the specific cause and clinical objective, to evaluate with metrics that respect the minority class, to guard rigorously against leakage by resampling within cross-validation, and to verify calibration whenever the class distribution has been altered.

9. References

1. He H, Garcia EA. Learning from imbalanced data. *IEEE Trans Knowl Data Eng.* 2009;21(9):1263–84.
2. Haixiang G, Yijing L, Shang J, Mingyun G, Yuanyue H, Bing G. Learning from class-imbalanced data: review of methods and applications. *Expert Syst Appl.* 2017;73:220–39.
3. Branco P, Torgo L, Ribeiro RP. A survey of predictive modeling on imbalanced domains. *ACM Comput Surv.* 2016;49(2):31.
4. Davis J, Goadrich M. The relationship between precision-recall and ROC curves. In: *Proc. 23rd Int. Conf. Machine Learning.* 2006. p. 233–40.
5. Saito T, Rehmsmeier M. The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets. *PLoS One.* 2015;10(3):e0118432.
6. Krawczyk B. Learning from imbalanced data: open challenges and future directions. *Prog Artif Intell.* 2016;5(4):221–32.
7. van den Goorbergh R, van Smeden M, Timmerman D, Van Calster B. The harm of class imbalance corrections for risk prediction models: illustration and simulation using logistic regression. *J Am Med Inform Assoc.* 2022;29(9):1525–34.
8. Douzas G, Bacao F, Last F. Improving imbalanced learning through a heuristic oversampling method based on k-means and SMOTE. *Inf Sci.* 2018;465:1–20.
9. Chawla NV, Bowyer KW, Hall LO, Kegelmeyer WP. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *J Artif Intell Res.* 2002;16:321–57.
10. Han H, Wang WY, Mao BH. Borderline-SMOTE: a new over-sampling method in imbalanced data sets learning. In: *Int. Conf. Intelligent Computing.* 2005. p. 878–87.
11. He H, Bai Y, Garcia EA, Li S. ADASYN: adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning. In: *Proc. IEEE IJCNN.* 2008. p. 1322–8.
12. Nguyen HM, Cooper EW, Kamei K. Borderline over-sampling for imbalanced data classification. *Int J Knowl Eng Soft Data Paradigms.* 2011;3(1):4–21.
13. Tomek I. Two modifications of CNN. *IEEE Trans Syst Man Cybern.* 1976;SMC-6(11):769–72.
14. Wilson DL. Asymptotic properties of nearest neighbor rules using edited data. *IEEE Trans Syst Man Cybern.* 1972;SMC-2(3):408–21.
15. Mani I, Zhang J. kNN approach to unbalanced data distributions: a case study involving information extraction. In: *Proc. ICML Workshop on Learning from Imbalanced Datasets.* 2003.
16. Batista GEAPA, Prati RC, Monard MC. A study of the behavior of several methods for balancing machine learning training data. *ACM SIGKDD Explor Newsl.* 2004;6(1):20–9.
17. Elkan C. The foundations of cost-sensitive learning. In: *Proc. 17th Int. Joint Conf. Artificial Intelligence.* 2001. p. 973–8.

18. Chen C, Liaw A, Breiman L. Using random forest to learn imbalanced data. Technical Report 666, Department of Statistics, University of California, Berkeley; 2004.
19. Liu XY, Wu J, Zhou ZH. Exploratory undersampling for class-imbalance learning. *IEEE Trans Syst Man Cybern B*. 2009;39(2):539–50.
20. Seiffert C, Khoshgoftaar TM, Van Hulse J, Napolitano A. RUSBoost: a hybrid approach to alleviating class imbalance. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*. 2010;40(1):185–97.
21. Chawla NV, Lazarevic A, Hall LO, Bowyer KW. SMOTEBoost: improving prediction of the minority class in boosting. In: *PKDD*. 2003. p. 107–19.
22. Lin TY, Goyal P, Girshick R, He K, Dollár P. Focal loss for dense object detection. In: *Proc. IEEE ICCV*. 2017. p. 2980–8.
23. Cui Y, Jia M, Lin TY, Song Y, Belongie S. Class-balanced loss based on effective number of samples. In: *Proc. IEEE CVPR*. 2019. p. 9268–77.
24. Cao K, Wei C, Gaidon A, Aréchiga N, Ma T. Learning imbalanced datasets with label-distribution-aware margin loss. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 32*. 2019. p. 1567–78.
25. Johnson JM, Khoshgoftaar TM. Survey on deep learning with class imbalance. *J Big Data*. 2019;6:27.
26. Buda M, Maki A, Mazurowski MA. A systematic study of the class imbalance problem in convolutional neural networks. *Neural Netw*. 2018;106:249–59.
27. Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, et al. Generative adversarial nets. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 27*. 2014. p. 2672–80.
28. Frid-Adar M, Diamant I, Klang E, Amitai M, Goldberger J, Greenspan H. GAN-based synthetic medical image augmentation for increased CNN performance in liver lesion classification. *Neurocomputing*. 2018;321:321–31.
29. Chicco D, Jurman G. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC Genomics*. 2020;21:6.
30. Fernández A, García S, Herrera F, Chawla NV. SMOTE for learning from imbalanced data: progress and challenges, marking the 15-year anniversary. *J Artif Intell Res*. 2018;61:863–905.
31. Lemaître G, Nogueira F, Aridas CK. Imbalanced-learn: a Python toolbox to tackle the curse of imbalanced datasets in machine learning. *J Mach Learn Res*. 2017;18(17):1–5.
32. Blagus R, Lusa L. SMOTE for high-dimensional class-imbalanced data. *BMC Bioinformatics*. 2013;14:106.
33. Kovács G. An empirical comparison and evaluation of minority oversampling techniques on a large number of imbalanced datasets. *Appl Soft Comput*. 2019;83:105662.

COMPARISON OF HOT AND COLD PRESSED BULK MgB_2 WITH MAGNESIUM STEARATE ADDITION

Assoc. Prof. Özge ERDEM

Bayburt University, Vocational School of Health Service
Department of Medical Services and Techniques, Opticianry Program
69000, Bayburt, Türkiye
ozgeerdem@bayburt.edu.tr
ORCID ID: 0000-0003-4542-941X

ABSTRACT

To elucidate the influence of hot and cold pressing on the structural and superconducting properties of MgB_2 containing 10 wt.% magnesium stearate [$\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$], three bulk samples were fabricated using the pellet-in-closed-tube technique. One un-doped MgB_2 sample was used as a reference, while two samples containing 10 wt.% $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ were compacted either at room temperature (cold pressed) or at 250°C for 1 h (hot pressed). All samples were subsequently sintered at 850°C for 2 h under an Ar atmosphere.

Structural and magnetic characterizations revealed that $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ addition slightly reduced the superconducting transition temperature (T_c) by approximately 1.3–1.4 K compared with the reference sample. Despite this decrease, significant improvements in the critical current density (J_c) were achieved. At 5 K and 3 T, J_c values were $2.31 \times 10^4 \text{ A cm}^{-2}$ for the reference sample, $3.67 \times 10^4 \text{ A cm}^{-2}$ for the hot-pressed sample, and $4.86 \times 10^4 \text{ A cm}^{-2}$ for the cold-pressed sample. At 20 K and 3 T, the corresponding J_c values were 7.39×10^3 , 8.92×10^3 , and $1.25 \times 10^4 \text{ A cm}^{-2}$, respectively.

The results indicate that $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ acts as an effective carbon source for MgB_2 . Hot pressing promotes more efficient carbon incorporation into the MgB_2 structure, leading to enhanced lattice disorder, increased defect density, improved densification, and a more homogeneous carbon distribution. These microstructural changes strengthen flux pinning and enhance superconducting performance under applied magnetic fields, demonstrating the beneficial role of thermomechanical processing in carbon-doped MgB_2 bulk superconductors.

Keywords: MgB_2 , hot-pressing, magnesium stearate.

1. INTRODUCTION

MgB₂ is a conventional low-temperature superconductor that became the subject of extensive research following the discovery of its superconducting transition at approximately 39 K in 2001 [1]. It has attracted significant attention in superconducting research area because of its relatively high critical temperature among low temperature superconductors, simple binary composition, low manufacturing cost, lightweight and low anisotropy. Unlike many conventional superconductors that require liquid helium cooling, MgB₂ can operate with cryocooler-based refrigeration systems, offering a more economical and practical alternative for large-scale applications. Consequently, MgB₂ has been extensively investigated for use in magnetic resonance imaging (MRI) magnets [2], superconducting magnetic energy storage (SMES), superconducting motors and generators [3], superconducting power transmission cables, fault current limiters [4], particle accelerator components [5], and high-field research magnets. Although MgB₂ has a wide range of engineering and industrial applications, the practical performance of MgB₂ is largely determined by its ability to sustain high critical current densities under applied magnetic fields. The critical current density (J_c) of MgB₂ decreases under high magnetic fields mainly because magnetic vortices become more mobile, resulting in flux motion and energy dissipation within the superconducting state and leading to a rapid decrease in the critical current density [6]. In addition, high magnetic fields weaken the superconducting state by suppressing the superconducting energy gap and reducing the density of Cooper pairs [7]. Furthermore, pure MgB₂ has relatively weak flux pinning centres [8], such as grain boundaries, structural defects or secondary-phase inclusions.

To improve the flux pinning ability of MgB₂ under high magnetic fields, various C-containing additives have been introduced into the MgB₂ matrix. The effectiveness of these additives strongly depends on their chemical compatibility and their ability to provide effective pinning centres without significantly degrading the superconducting phase. Among the numerous carbon sources investigated in literature because of resistivity of MgB₂ structure to other chemicals, hydrocarbons, carbohydrates and polymers as adding/doping powders to MgB₂ matrix [9-15] have attracted considerable interest owing to their ability to supply effective carbon as pinning centres during heat treatment and to enhance the microstructure of MgB₂. Previous researches have shown that these additives can increase the upper critical magnetic field (H_{c2}), the irreversibility field (H_{irr}), and the critical current density (J_c) under applied high magnetic fields, by promoting carbon substitution and improving flux pinning [11, 14].

In the previous study [16], magnesium stearate [Mg(C₁₈H₃₅O₂)₂] was used as an additive because of its high C content, relatively low melting point (~145°C) and decomposition temperature above 300°C. Mg(C₁₈H₃₅O₂)₂ is widely used as a flow agent and lubricant in powder-processing applications. During the heat-treatment process, magnesium stearate is expected to melt and form transient liquid phase that can homogeneously diffuse throughout the precursor powder mixture and promote uniformly distribution of C to the MgB₂ structure. Consequently, Mg(C₁₈H₃₅O₂)₂ is expected to act as an effective carbon source, contributing to the formation of additional flux pinning centres into MgB₂. Moreover, as Mg(C₁₈H₃₅O₂)₂ includes magnesium content, it may partially compensate for Mg loss caused by evaporation

during sintering, which could contribute to improved phase formation and a more homogeneous microstructure.

In superconductors, high density and strong grain connectivity are key factors to achieve superior superconducting performance, particularly under high magnetic fields. It is known from the literature that the hot pressing is an effective technique to enhance the density of bulk MgB_2 and improve the grain connectivity [17]. While the superconducting current is passing from one grain to another, poor connectivity acts as a barrier to current flow and thus limits the critical current density. Enhanced densification decreases the amount of porosity and voids within the material, resulting more continuous paths for electrical current, reducing weak links between superconducting grains. Accordingly, in this study hot pressing at 250°C was employed to enhance the MgB_2 bulk structure and grain connectivity. In addition, to evaluate the influence of hot pressing on the microstructural and magnetic properties of MgB_2 with $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ addition, hot and cold pressed samples were produced and the superconducting properties of them were systematically compared.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

Following the previous investigation on the influence of different adding ratio of $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ on the superconducting performance of bulk MgB_2 superconductor [16], the present study focuses on the role of hot pressing. In particular, the different effects of hot pressing and conventional cold pressing on the microstructure and superconducting properties of $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added bulk MgB_2 were systematically examined.

Three bulk samples were fabricated using the pellet-in-closed-tube technique. An undoped sample was prepared as a reference by conventional cold pressing at room temperature. The two additional samples containing 10 wt.% $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ were pressed either by conventional cold pressing at room temperature or by hot pressing at 250°C for 1 h. After pressing, all samples were sintered at 850°C for 2 h under an argon (Ar) atmosphere at 1.5 bar pressure.

The influence of hot pressing was assessed through phase identification, microstructural characterization, and magnetic measurements using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and a physical property measurement system (PPMS), respectively. The experimental results obtained from the hot-pressed and cold-pressed samples were directly compared to clarify the effect of hot pressing on the superconducting performance of $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added bulk MgB_2 .

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Fig. 1 shows the XRD patterns of the reference sample and 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added cold pressed and hot pressed samples. XRD analysis confirmed that MgB_2 as a main phase for all samples. The MgO secondary phase content increased for 10 wt % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added cold pressed sample. Using Rietveld analysis [18], the a-lattice parameters were determined and obtained as 3.084, 3.077 and $3.073 \text{ \AA}$ for the reference sample [16] and 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added cold pressed [16] and hot pressed samples, respectively. The a-lattice parameter decreased for both $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added samples. The shrinkage of the a-lattice

parameter would be strong evidence for the C substitution into B sites, which causes disorder in the MgB_2 structure [19, 20], due to the contraction of the in-plane lattice, since the covalent radii of C is lower than that of B, and the degradation of the crystallinity.

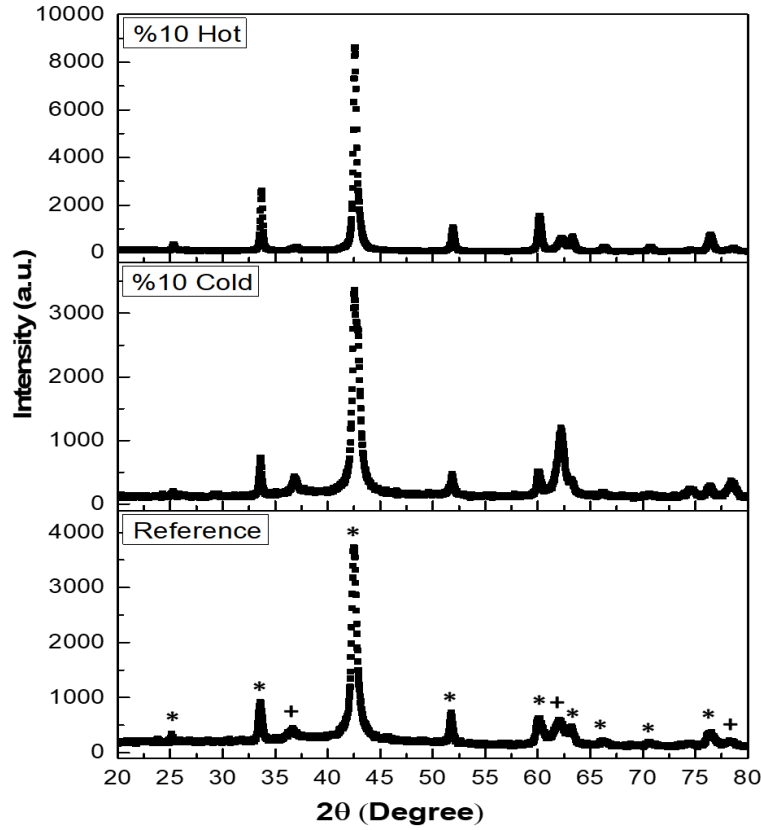


Figure 1. XRD patterns of the reference sample [16] and 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added cold pressed [16] and hot pressed samples. The asterisk and plus symbols indicate MgB_2 and MgO phases, respectively.

Fig. 2 presents the SEM images of the studied samples. The $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ containing samples exhibited a denser and more compact microstructure, compared with the reference one. The highest degree of densification and the most homogeneous microstructure were observed in the hot-pressed sample.

Fig. 3 exhibits the magnetic moment versus temperature, $m(T)$ curves for the studied samples. The superconducting transition temperature (T_c) slightly decreases with $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ addition. The T_c values were respectively obtained as 37.55 K [16], 36.22 K [16] and 36.18 K for the reference sample and 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added cold pressed and hot pressed samples. The reduced density of states and the weakened electron-phonon coupling are considered the primary reasons for the decrease in T_c in C-doped samples [21, 22]. In addition, C-located at grain boundaries and C-substituted into B sites may increase intra-grain scattering, contributing to the variation of T_c [23], for 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added samples.

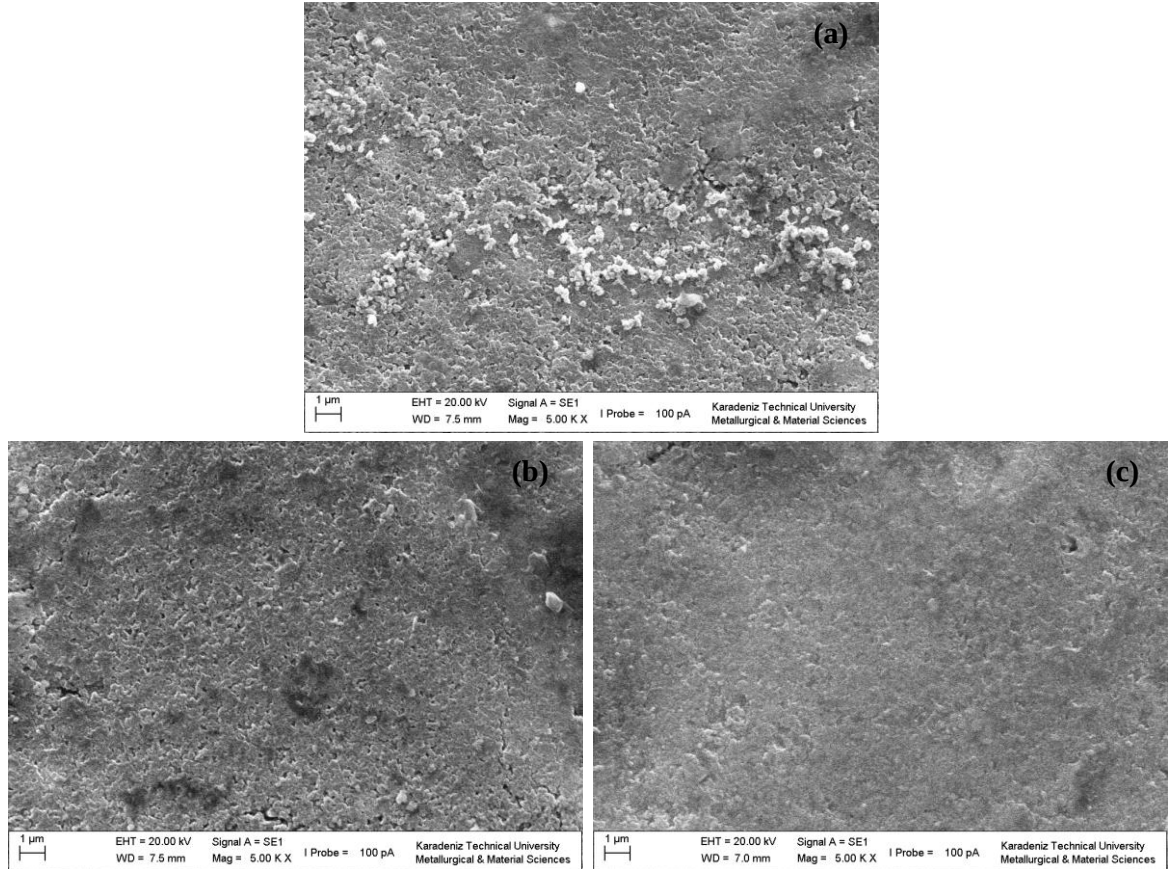


Figure 2. SEM images of (a) the reference, and (b) 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added cold pressed and (c) 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added hot pressed samples

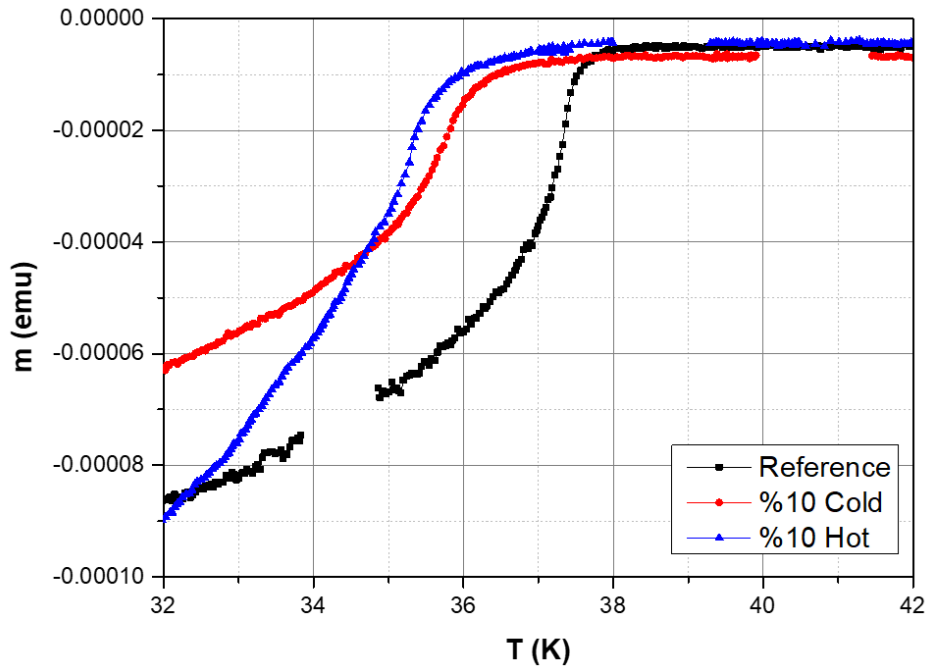


Figure 3. Magnetic moment versus temperature, $m(T)$ curves for the reference sample [16], and 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added cold pressed [16] and 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added hot pressed samples

Fig. 4 shows the magnetisation as a function of applied magnetic field, $M(\mu_0H)$ at 5 K and 20 K for the studied samples. At 5 K, the thermomagnetic flux avalanches (flux jumps) can be seen for all samples, which are attributed to thermomagnetic instabilities associated with high critical current density and insufficient heat dissipation under local adiabatic conditions.

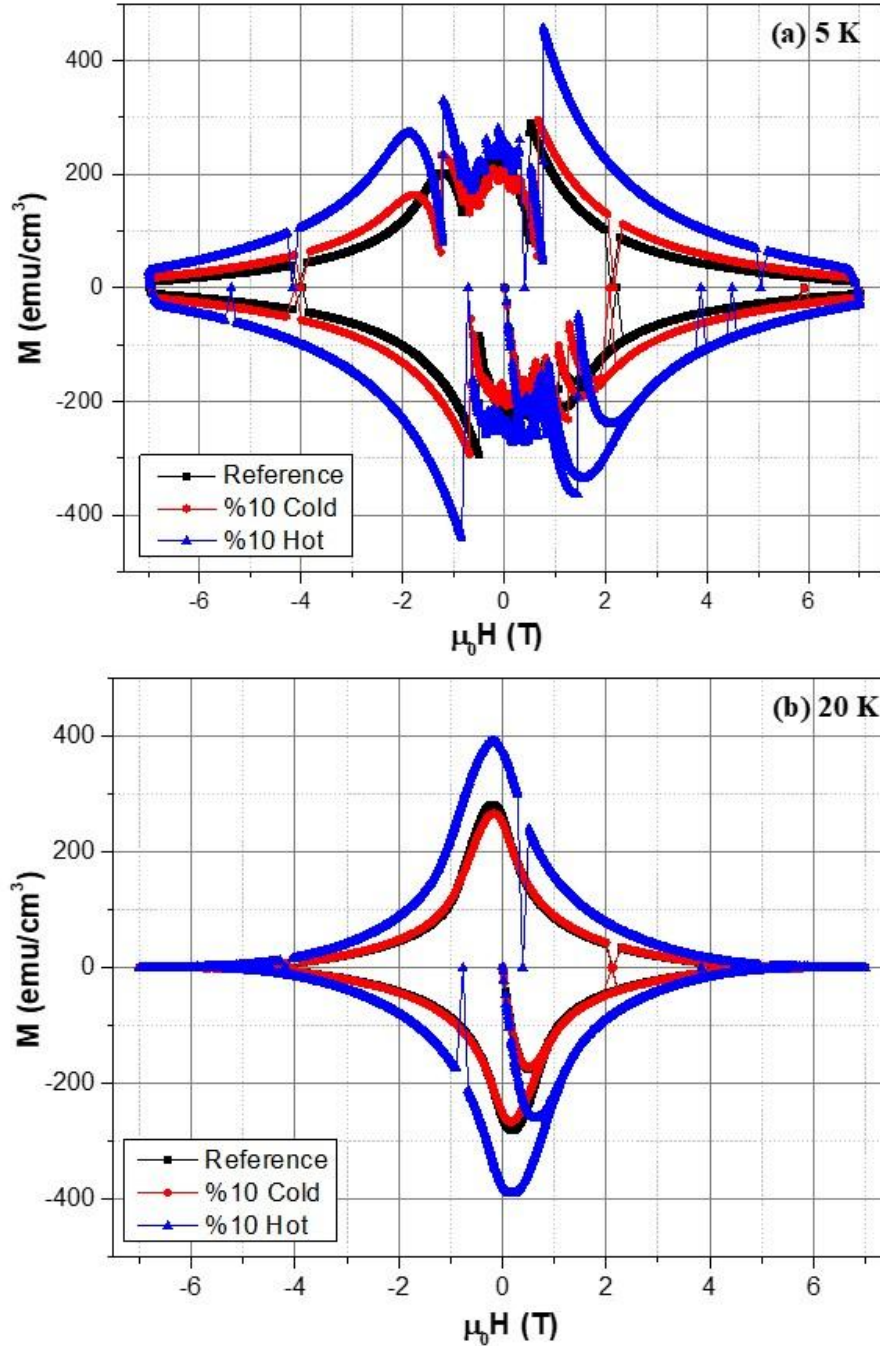


Figure 4. Magnetisation depending on magnetic field, $M(\mu_0H)$ curves for the reference sample [16], 10 wt. % $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ added cold pressed sample [16] and 10 wt. % $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ added hot pressed sample at (a) 5 K and (b) 20 K

Based on the $M(\mu_0H)$ curves in Fig. 4, the critical current densities (J_c) at 5 K and 20 K for all samples were calculated using Bean's critical state model [24], and the results are

presented in Fig. 5. The J_c values at both measurement temperatures increased for 10 wt % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added samples, compared to the reference one, especially at high magnetic fields.

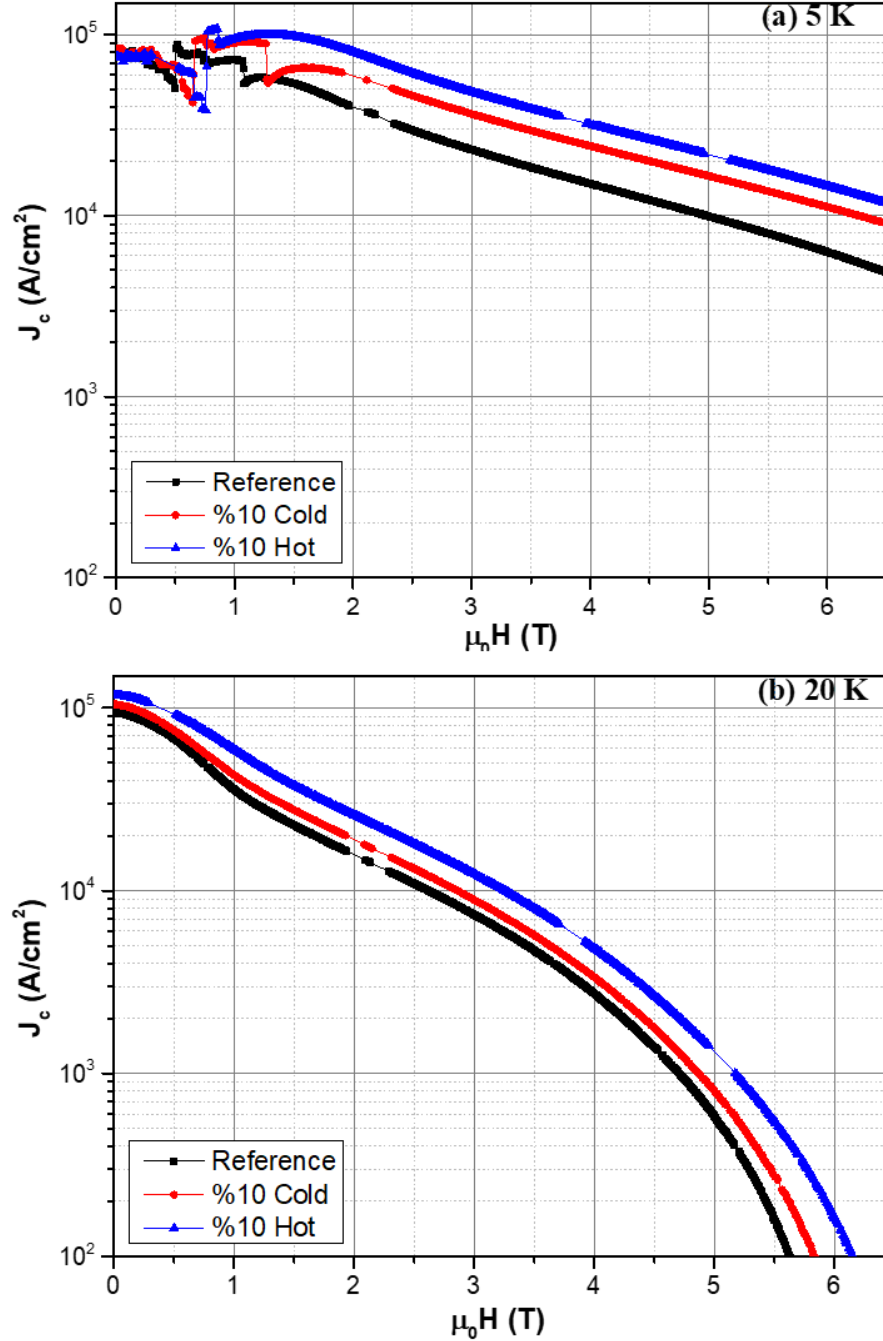


Figure 5. Critical current density depending on magnetic field, $J_c(\mu_0 H)$ curves for the reference sample [16], 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added cold pressed sample [16] and 10 wt. % $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ added hot pressed sample at (a) 5 K and (b) 20 K

Table 1 summarizes the J_c values at 5 K and 20 K under an applied magnetic field of 3 T. The enhancement of in-field J_c in the cold pressed and hot pressed samples with $\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ addition can be primarily attributed to the C substitution at B sites in the MgB_2 lattice, which increases the upper critical magnetic field (H_{c2}) [25]. This interpretation is supported by the decrease in a-lattice parameter together with the corresponding suppression of

T_c for these samples. Furthermore, the microstructural improvement, characterized by increased densification and enhanced surface homogeneity (see Fig. 2), is expected to strengthen grain connectivity by reducing weak links between superconducting grains, thereby contributing to the improvement in in-field J_c . The highest J_c values were obtained as 4.86×10^4 A/cm² and 1.25×10^4 A/cm² for the hot pressed sample containing 10 wt % $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ addition. These results indicate that hot pressing is an effective processing route for promoting C substitution and enhancing the microstructure of bulk MgB_2 samples with $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ addition, resulting in enhanced superconducting performance.

Table 1. The critical current density (J_c) values for the reference [16], 10 wt. % $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ added cold pressed [16] and 10 wt. % $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ added hot pressed samples at 5 K and 20 K under 3 T applied magnetic field

Samples	J_c (A/cm ²)	J_c (A/cm ²)
	5 K, 3 T	20 K, 3 T
Reference	2.31×10^4	7.39×10^3
%10 Cold	3.67×10^4	8.92×10^3
%10 Hot	4.86×10^4	1.25×10^4

4. CONCLUSIONS

In this study, the effects of hot pressing on the superconducting properties of $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ added bulk MgB_2 were investigated and compared with those of conventional cold pressing. The results represent that hot pressing does not alter the phase composition of MgB_2 and contributes to the reduction of MgO impurity phase in the MgB_2 structure. Moreover, hot pressing effect is similar to cold pressing on the T_c value for $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ added bulk MgB_2 . Hot pressing is more effective than cold pressing to improve the flux pinning capability of bulk MgB_2 under applied magnetic fields by enhancing the surface morphology and increasing sample homogeneity and density. Therefore, hot pressing can be considered a simple and effective processing technique for the fabricating of $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ added bulk MgB_2 with enhanced in-field J_c .

REFERENCES

- [1] Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y., & Akimitsu, J. (2001). Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. *Nature*, 410(6824), 63–64.
- [2] Majoros, M., Sumption, M. D., Parizh, M., Wan, F., Rindfleisch, M. A., Doll, D., ... & Collings, E. W. (2022). Magnetic, mechanical and thermal modeling of superconducting, whole-body, actively shielded, 3 T MRI magnets wound using MgB_2 strands for liquid cryogen free operation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32(4), 1-4.
- [3] Terao, Y., Fuchino, S., Mawatari, Y., Yoshida, Y., Matsumoto, A., Sugano, M., ... & Tanaka, H. (2023). Electromagnetic design of ultra-high speed superconducting motors applied to electric pumps in liquid-propellant rockets. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 612, 1354320.

- [4] Shen, B., Chen, Y., Li, C., Wang, S., & Chen, X. (2021). Superconducting fault current limiter (SFCL): Experiment and the simulation from finite-element method (FEM) to power/energy system software. *Energy*, 234, 121251.
- [5] Yamamoto, A. (2022). Advances in MgB₂ Superconductor Applications for Particle Accelerators. *arXiv preprint* arXiv:2201.09501.
- [6] Bugoslavsky, Y., Perkins, G. K., Qi, X., Cohen, L. F., & Caplin, A. D. (2001). Vortex dynamics in superconducting MgB₂ and prospects for applications. *Nature*, 410(6828), 563-565.
- [7] Tinkham, M. (2004). *Introduction to superconductivity*. Courier Corporation.
- [8] Dou, S. X., Soltanian, S., Horvat, J., Wang, X. L., Zhou, S. H., Ionescu, M., ... & Tomsic, M. (2002). Enhancement of the critical current density and flux pinning of MgB₂ superconductor by nanoparticle SiC doping. *Applied Physics Letters*, 81(18), 3419-3421.
- [9] Liu, Y., Yang, Y., Ni, H., Cheng, C., Ke, C., & Zhao, Y. (2024). Significant enhancement of J_c and flux pinning mechanism of MgB₂ doped with PEG-polymers. *Physics Letters A*, 500, 129376.
- [10] Li, W., Li, J., Liu, Y., Qu, J., Liu, B., Zhu, M., ... & Zheng, R. (2019). Artificial 2D flux pinning centers in MgB₂ induced by graphitic-carbon nitride coated on boron for superconductor applications. *ACS Applied Nano Materials*, 2(9), 5399-5408.
- [11] Katsura, Y., Yamamoto, A., Ueda, S., Iwayama, I., Horii, S., Shimoyama, J. I., & Kishio, K. (2007). Flux pinning properties of undoped and C-doped MgB₂ bulks with controlled grain sizes. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 460, 572-573.
- [12] Shekhar, C., Giri, R., Tiwari, R. S., Srivastava, O. N., & Malik, S. K. (2007). Enhancement of flux pinning and high critical current density in graphite doped MgB₂ superconductor. *Journal of Applied Physics*, 102(9).
- [13] Vajpayee, A., Awana, V. P. S., Balamurugan, S., Takayama-Muromachi, E., Kishan, H., & Bhalla, G. L. (2007). Effect of PVA doping on flux pinning in bulk MgB₂. *Physica C: Superconductivity*, 466(1-2), 46-50.
- [14] Soltanian, S., Horvat, J., Wang, X. L., Munroe, P., & Dou, S. X. (2003). Effect of nano-carbon particle doping on the flux pinning properties of MgB₂ superconductor. *Physica C: Superconductivity*, 390(3), 185-190.
- [15] Erdem, O. (2019). Comparative study of hot and cold press and their effect on superconducting properties of coronene added bulk MgB₂. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 565, 1353508.
- [16] Erdem, O. (2026). Enhancement of the superconducting properties of bulk MgB₂ by magnesium stearate addition. *Proceedings of the EGE 15th International Conference on Applied Sciences* (Vol. 1, pp. 447–457). Academy Global Publishing House. <https://www.egekongresi.org/kongre-kitaplari>
- [17] Yamada, Y., Nakatsuka, M., Nitta, A., Tachikawa, K., & Kumakura, H. (2007). Superconducting Properties and Structure of In-Situ MgB₂ Tapes with SiC and TiC Addition Prepared by Hot Pressing. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2), 2911-2914.
- [18] Rietveld, H. M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Applied Crystallography*, 2(2), 65-71.

- [19] Lee, S., Masui, T., Yamamoto, A., Uchiyama, H., & Tajima, S. (2004). Crystal growth of C-doped MgB_2 superconductors: accidental doping and inhomogeneity. *Physica C: Superconductivity*, 412, 31-35.
- [20] Eisterer, M. (2007). Magnetic properties and critical currents of MgB_2 . *Superconductor Science and Technology*, 20(12), R47-R73.
- [21] De la Peña-Seaman, O., De Coss, R., Heid, R., & Bohnen, K. P. (2010). Electron-phonon coupling and two-band superconductivity of Al-and C-doped MgB_2 . *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 82(22), 224508.
- [22] Novko, D., Caruso, F., Draxl, C., & Cappelluti, E. (2020). Ultrafast hot phonon dynamics in MgB_2 driven by anisotropic electron-phonon coupling. *Physical Review Letters*, 124(7), 077001.
- [23] Ojha, N., Malik, V. K., Singla, R., Bernhard, C., & Varma, G. D. (2009). The effect of citric and oxalic acid doping on the superconducting properties of MgB_2 . *Superconductor Science and Technology*, 22(12), 125014.
- [24] Bean, C. P. (1962). Magnetization of hard superconductors. *Physical Review Letters*, 8(6), 250.
- [25] Ye, S. J., Matsumoto, A., Zhang, Y. C., & Kumakura, H. (2014). Strong enhancement of high-field critical current properties and irreversibility field of MgB_2 superconducting wires by coronene active carbon source addition via the new B powder carbon-coating method. *Superconductor Science and Technology*, 27(8), 085012.

STATİK Q AÇISI DİNAMİK İNİŞ MEKANİĞİNİ YANSITIYOR MU?

Dr.Öğr.Üyesi, Burak TAŞ

İstanbul Gelişim Üniversitesi, btas@gelisim.edu.tr - 0000-0003-4977-4886

Dr.Öğr.Üyesi, Onur YILDIRIM

İstanbul Gelişim Üniversitesi, onyildirim@gelisim.edu.tr - 0000-0001-8407-2412

Arş.Gör., Şevval ÖZKAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi, seozkan@gelisim.edu.tr - 0009-0003-5614-6164

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, genç kadın sporcularda statik kuadriseps açısı (Q açısı) ve vücut kompozisyonunun dinamik iniş mekaniği üzerindeki etkilerini incelemektir. Dinamik aktivitelerde görülen hatalı hareket kalıpları ve artmış diz valgusu, ön çapraz bağ yaralanmaları için önemli değiştirilebilir biyomekanik risk faktörleridir. Bu doğrultuda statik Q açısı ve vücut kompozisyonu parametrelerinin Landing Error Scoring System (LESS) skorları ve Frontal Plane Projection Angle (FPPA) ile ilişkisi araştırılmıştır.

Yöntem: Çalışmaya sağ alt ekstremitde dominant 24 kadın sporcu dahil edilmiştir (yaş: 17.04 ± 0.36 yıl; BKİ: 20.65 ± 2.62 kg/m²). Vücut kompozisyonu biyoelektrik impedans analiziyle değerlendirilmiştir. Statik Q açısı, anatomik referans noktaları işaretlendikten sonra frontal düzlem fotoğrafları üzerinden ölçülmüştür. Drop vertical jump sırasında iniş performansları frontal ve sagittal düzlemlerden 120 fps kameralar ile video kaydına alınmış; LESS skorları ve FPPA Kinovea yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir.

Bulgular: Sağ Q açısı ile sağ FPPA ($\rho=-0.440$, $p=0.031$) ve sol FPPA ($\rho=-0.490$, $p=0.015$) arasında negatif yönde anlamlı ilişkiler bulunmuştur. Vücut yağ yüzdesi ile LESS skorları arasında pozitif yönde anlamlı ilişki saptanmıştır ($r=0.521$, $p=0.009$). Regresyon modeli sağ FPPA varyansının %22.6'sını açıklamıştır. Sağ Q açısının sağ FPPA üzerindeki negatif etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir ($\beta=-0.394$, $p=0.060$). ROC analizinde sağ Q açısı için 15.00° potansiyel eşik değer olarak belirlenmiş; duyarlılık %78.6, özgüllük %60.0 bulunmuştur. Ancak model istatistiksel anlamlılığa ulaşmamıştır ($p=0.143$).

Sonuç: Statik Q açısı dominant ekstremitde dinamik diz valgusu eğilimiyle ilk bakışta ilişkili görünse de tek başına kesin bir tarama aracı olarak değerlendirilmemelidir. Öte yandan, yüksek vücut yağ oranı, belirli frontal düzlem eklem açılarını değiştirmek yerine, genel hareket kalitesini bağımsız olarak olumsuz etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler: Ön Çapraz Bağ, Diz Valgusu, Kinematik Analiz, Yaralanma Riski

**"YAPAY ZEKÂ TABANLI GÖRSEL ARAMA VE KİŞİSELLEŞTİRME:
TEKNOLOJİ KABUL MODELİ ÇERÇEVESİNDE TRENDYOL DENEYİMİ VE
DÜRTÜSEL SATIN ALMA"**

Öğr. Gör. Şeyda YILDIZ ÇAKIR

İstanbul Şişli Meslek Yüksekokulu, seydayildiz.cakir@sisli.edu.tr, 0009-0008-1656-9273

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, yapay zekâ tabanlı görsel arama ve kişiselleştirilmiş öneri sistemlerinin kullanıcı deneyimi (UX) üzerindeki etkisini Teknoloji Kabul Modeli (TAM) çerçevesinde incelemek ve bu teknolojilerin tüketicilerin dürtüsel satın alma davranışlarını nasıl tetiklediğini Trendyol örneği üzerinden derinlemesine analiz etmektir. Araştırma, nitel araştırma yöntemlerine dayanmaktadır. Veriler, son altı ay içinde Trendyol platformunda görsel arama özelliğini kullanmış ve bu süreçte planlanmamış (dürtüsel) alışveriş yapmış 20 tüketici ile yarı yapılandırılmış görüşmeler yapılarak toplanmıştır. Elde edilen nitel veriler, Teknoloji Kabul Modeli'nin (TAM) "Algılanan Kullanım Kolaylığı" ve "Algılanan Fayda" boyutları temel alınarak tümdengelimsel içerik analizine tabi tutulmuştur. Araştırmanın kapsamını e-ticaret sektöründeki yapay zekâ uygulamaları (görsel arama ve kişiselleştirilmiş öneriler) oluşturmaktadır. Bulgular, görsel aramanın metin yazma yükünü azaltarak yüksek kullanım kolaylığı sunduğunu, kişiselleştirilmiş önerilerin ise nokta atışı ürün bulma noktasında algılanan faydayı maksimize ettiğini göstermektedir. Bu sürtünmesiz (frictionless) kullanıcı deneyimi, tüketicilerin rasyonel değerlendirme mekanizmasını esneterek anlık tatmin arayışını ve dolayısıyla dürtüsel satın alma davranışını doğrudan tetiklemektedir. Sonuç olarak çalışma, yapay zekâ destekli e-ticaret araçlarının sadece arama kolaylığı sağlayan teknik unsurlar olmadığını, aynı zamanda tüketici psikolojisini manipüle ederek plansız satın alma kararlarını hızlandıran güçlü birer stratejik araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler : Yapay Zekâ, Görsel Arama, Teknoloji Kabul Modeli (TAM), Kullanıcı Deneyimi (UX), Dürtüsel Satın Alma, Trendyol.

A COMPARATIVE EVALUATION OF DEEP LEARNING MODELS FOR SHORT-TERM LOAD FORECASTING IN LOW-VOLTAGE SMART GRIDS

Assist. Prof. Dr., Faruk KÜRKER

Adiyaman University, fkurker@adiyaman.edu.tr- 0000-0003-1544-9743

Abstract

Short-term load forecasting serves as the main decision-making challenge for operational safety energy management and operational planning needs in low-voltage distribution networks. The study compared different deep learning models to determine their forecasting capabilities by testing them on a multivariate low-voltage smart grid dataset which included electrical measurements and environmental variables and temporal characteristics. In this context, the LSTM, BiLSTM, CNN-LSTM, CNN-BiLSTM, and CNN-BiLSTM-Attention architectures were examined under the same data splitting strategy, preprocessing steps, sliding window structure, and training conditions. The input data was structured to predict the active load value at the next time step using multivariate observations from the previous 48 time steps. Modeling and performance analyses were performed on the time series of the selected N01 node. Model performance was evaluated using the MAE, RMSE, MAPE, sMAPE, nRMSE, and R^2 metrics. According to the results, the LSTM model was the most successful in terms of overall prediction performance. The LSTM model demonstrated strong prediction performance with values of MAE = 0.1859, RMSE = 0.2303, nRMSE = 7.6998, and $R^2 = 0.9735$. In contrast, the CNN-BiLSTM-Attention architecture produced higher error values. Ablation analysis showed that the attention mechanism did not improve performance on this dataset. The reported results are valid for the selected N01 node and the one-week data subset analyzed. Overall, it was observed that model success depends on the architectural structure and data characteristics.

Keywords: Short-term load forecasting; low-voltage smart grid; multivariate time series; LSTM; CNN-BiLSTM; attention mechanism; model complexity

1. Introduction

Electricity load forecasting plays a critical role in the safe, economical, and efficient operation of power systems; in particular, short-term load forecasting (STLF) stands out as a fundamental decision-support tool in operational processes such as generation planning, supply-demand balancing, energy trading, and system security [1]–[3]. Rising energy demand, the integration of renewable energy sources into power systems, and operational uncertainties in distribution networks necessitate more accurate and timely forecasts of load behavior [4]–[7]. This is particularly important for monitoring node-based load changes and evaluating short-term forecasting models, especially in low-voltage distribution networks.

A variety of solutions have been proposed in the literature to solve the load forecasting problem, including classical time-series models such as ARIMA, regression, and exponential smoothing methods, as well as artificial neural network models, support vector machines, and fuzzy logic-based models [2], [3]. In some cases, the nonlinear, nonstationary, and multivariate characteristics of load data may decrease the performance of classical methods in the forecast

problem. Recently, however, deep learning methods have gained popularity because of their capability to capture long-term dependences in time-series data; models such as LSTM, GRU, and RNN have been increasingly applied in short-term load forecasting applications [3]. Besides, the high success of CNN-based models in local patterns detection has increased the popularity of these models within hybrid frameworks combined with temporal models such as LSTM and BiLSTM [6], [7].

Nonetheless, it is impossible to say that more complex model architectures always lead to better prediction results for any load data. Indeed, the level of variability in load data, the periodicity of load data, the number of samples, the sampling frequency, and the explanatory variables used in modeling may significantly influence the performance of different models [8], [9]. While the use of additional information such as meteorological variables, temporal features, and electrical operation parameters improves the prediction accuracy, it may make models too complex, leading to overfitting [5], [7]. Thus, even though hybrid approaches, data decomposition techniques, and attention mechanisms have recently been developed to solve the load forecasting problem, it is impossible to expect such approaches to outperform other methods in all short-term load forecasting applications [10]–[15].

Additionally, recently multi-step forecasting cases have led to broadening the scope of short-term load forecasting studies in terms of applications including electric vehicles' charging stations, distribution systems, and residential load profiles [16]–[19]. It can be seen that those studies include investigations of LSTM based models, hybrid deep learning algorithms, attention based methods and model comparison analyses with respect to various data types. However, it is seen that there is no similar improvement for the increase in model complexity on each data set, so model selection should be done in connection with data properties.

In the light of the review of existing literature, the connection between model complexity and forecast accuracy changes according to data properties. Namely, node-based load profiles in the low-voltage distribution networks include multivariate data types which should be investigated along with electrical data, distributed energy sources, environmental data and time-series data. In this way, the need for systematic comparisons of different deep learning architectures under identical conditions and analysis whether complex architectures provide any advantage on this data set arises.

Different from residential smart home energy consumption or demand side management cases, the focus of this study lies on the multivariate load profiles of low-voltage distribution network nodes. The short-term load forecasting problem is studied by using the load profile data obtained from the "Low Voltage Smart Grid Planning Dataset" which is an open-access data set on Kaggle platform [20]. In this context, the performances of the LSTM, BiLSTM, CNN-LSTM, CNN-BiLSTM and CNN-BiLSTM-Attention architectures have been compared under identical conditions of data splitting, preprocessing, sliding window structure and training process.

In this respect, the main contributions of the research can be stated as follows:

(i) Comparison of five different deep learning architectures on multivariate node-based load profiles of a low-voltage distribution network under the same experimental conditions;

(ii) Joint assessment of the short-term load forecasting performance of LSTM, BiLSTM, CNN-LSTM, CNN-BiLSTM, and CNN-BiLSTM-Attention models through error metrics and diagnostic assessments;

(iii) Investigation of a multivariate input structure involving electrical, environmental, and temporal variables in the scope of low-voltage grid load forecasting;

(iv) Evaluation of the contribution of the attention mechanism by conducting ablation analysis and quantifying whether this part improves the forecast performance on the relevant dataset;

(v) Proof through a comparative analysis based on data properties that the rise in model complexity does not always result in better prediction accuracy.

2. Materials and Methods

2.1. Dataset

In the current study, the "Low Voltage Smart Grid Planning Dataset" accessible via the Kaggle website [20] has been utilized. The dataset consists of the load profiles, electrical operational variables, distributed energy generation, transformer assets, and grid topology information of a low-voltage distribution network. The data description provided in the Kaggle dataset mentions that the data set has been created using real-world smart meter measurements, transformer records, and network structural layout. In this study, node-based time-series data extracted from the `load\_profiles.csv` file have been used for short-term load forecasting.

The chosen data subset is composed of the data recorded between January 1, 2025, and January 7, 2025, with a 30-minute time resolution. In this way, the dataset has measurement data from 20 different grid nodes, with 336 time steps per node. Consequently, a multivariate time-series data structure, including a total of 6,720 observation points has been formed. With such a structure, it becomes possible to observe the changes in the load profile over time for different nodes and evaluate the short-term load forecasting models comparatively. While the dataset usually has measurements from 20 different grid nodes, in this study, only one of those nodes (N01) has been selected for modeling and comparison of performance. For this reason, the results of model performances mentioned in this study indicate the success of the short-term load forecasting for the selected node.

The variables included in the dataset have been grouped in such a way that they cover electrical, environmental, and temporal factors that can affect load behaviors. Electrical variables include active power consumption, voltage, frequency, power factor, reactive power, and distributed energy generation. Environmental variables involve the temperature, solar irradiance, wind speed, and humidity values. In addition, the timestamp and grid node ID variables have been used to maintain the time-series and node-based nature of the dataset. The variables used in this study are presented in Table 1.

Table 1. Variables Used

Variables	Description
Node_ID	Grid node ID
Timestamp	Time data (30-minute measurement interval)
Load (kW)	Active power consumption
Voltage (V)	Voltage
Frequency (Hz)	Frequency
Power Factor	Power factor
Reactive Power (kVAR)	Reactive power
DER Generation (kW)	Distributed generation
Temperature (°C)	Temperature
Solar Irradiance (W/m ²)	Solar irradiance
Wind Speed (m/s)	Wind speed
Humidity (%)	Humidity

2.2. Data Preprocessing

As a result of the preliminary tests carried out on the dataset, it turned out that there were no missing observations (MissingCount = 0). The timestamp variable was formatted correctly in accordance with the date-time format, and the dataset was placed in chronological order. In order to maintain the multinode structure of the data, first of all, sorting of the observations was carried out by the Node_ID variable, and then by the Timestamp variable. This was necessary to preserve the time series structure of the data before modeling.

In order to improve the suitability of the time series for modeling, cyclical variables were added, which are derived based on the time information. In this case, the time variable is divided into two components using sine and cosine transformations. It should be noted that this method allows preserving the cyclic structure of the time information and transferring daily cycles numerically into the model.

Numerical input variables and the target variable were z-score normalized to eliminate the impact of different scales of variables on the analysis. After the normalization of the data, the sliding window samples were created and split into the training, validation, and test datasets while preserving the chronological order of the time series. Thanks to this procedure, electrical, environmental, and time variables with different numerical scales could be used in modeling.

2.3. Descriptive Statistics

Descriptive statistics for the dataset are summarized in Table 2. Calculation of these statistics was performed in order to evaluate the properties of central tendency, dispersion, and distribution of the considered variables.

Table 2. Descriptive statistics

Variable	Mean	Median	Std	Variance	Min	Max	Range	IQR	Skewness	Kurtosis
Load (kW)	3.610	3.620	1.668	2.783	-0.400	7.270	7.670	2.530	0.026	2.130
Voltage (V)	230.004	230.000	1.511	2.284	224.000	236.700	12.700	2.000	-0.025	2.975
Frequency (Hz)	50.001	50.000	0.050	0.003	49.800	50.200	0.400	0.060	0.022	3.045
Power Factor	0.914	0.910	0.037	0.001	0.850	0.980	0.130	0.070	0.017	1.844
Reactive Power (kVAR)	1.566	1.460	0.850	0.723	-0.200	4.230	4.430	1.210	0.535	2.748
DER Generation (kW)	0.258	0.000	0.584	0.341	0.000	2.270	2.270	0.000	2.092	5.813

Temperature (C)	30.041	30.000	3.017	9.100	19.700	40.500	20.800	4.100	-0.004	2.935
Solar Irradiance (W m ⁻²)	254.853	6.550	310.074	96145.994	0.000	967.700	967.700	565.750	0.686	1.802
Wind Speed (m s ⁻¹)	2.502	2.490	0.494	0.244	0.410	4.360	3.950	0.680	0.054	3.016
Humidity (%)	45.104	45.200	8.665	75.078	30.000	60.000	30.000	15.000	-0.032	1.806

From the analysis of Table 2, it is evident that the mean and median values of the active load variable are almost equal and that the skewness value is kept low. It means that the distribution of the active power consumption in the selected data subset has approximately symmetrical structure. However, the negative minimum value of the load variable means that the net load might demonstrate low or inverse values during certain time periods. This case could be caused by the influence of distributed generation or by the definition of net power in the selected dataset. Both voltage and frequency variables have low standard deviations. This fact means that these electrical parameters changed within a small range of values over the analyzed period. On the contrary, the reactive power, distributed generation, and solar irradiance variables demonstrated higher variability. In particular, the zero values of the median and IQR of the DER Generation variable indicate that a lot of distributed generation values are zeros or almost zeros. The distinctive difference between the mean and median values and the large standard deviation in the solar irradiance variable show that this variable has a wide distribution range due to the intraday variation.

In general, the dataset consists of relatively constant electrical quantities and more volatile environmental and distributed generation variables. Such a combination allows using the multivariate time series approach in the considered load forecasting problem.

2.4. Data Analysis

Correlation analysis and visualization techniques have been applied in order to determine structural features of the dataset and relationships between variables. Such analyses have been carried out in order to analyze trends, periodicity, and variable relationships prior to the modeling procedure. The correlation heat map presented in Figure 1 demonstrates linear relationships between numerical variables. Correlation analysis gives preliminary information about the direction and degree of relationship between the load variable and the electrical, environmental, and distributed generation variables. This result means that, while working on the short-term load forecasting task, one can use both historical data on the load values and multivariate information as explanatory variables.

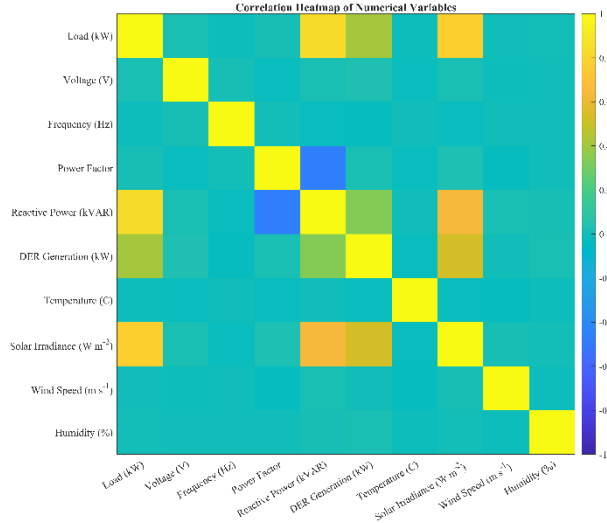


Figure 1. A correlation heat map showing the linear relationships between variables.

The load time series presented in Figure 2 demonstrates how the load varies depending on the time. While analyzing this graph, one can notice that the load data demonstrate some fluctuations and recurrent patterns. That is why one can use such modeling techniques which take time dependence into account.

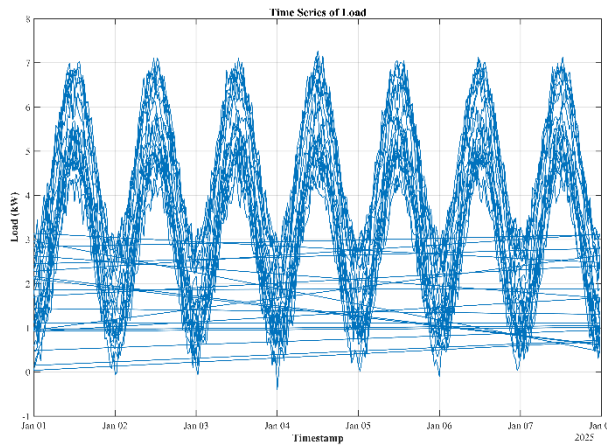


Figure 2. A time series graph showing the time-dependent variation and periodic patterns of the load.

The heat map showing distribution of the load per hour presented in Figure 3 demonstrates the distribution of the load per hour and areas of temporal concentration. The variation of load values within specific hours means that there are daily cycles in the dataset. That is why one can use the cyclical characteristics extracted from the hourly data to take temporal regularity of the load into account in modeling.

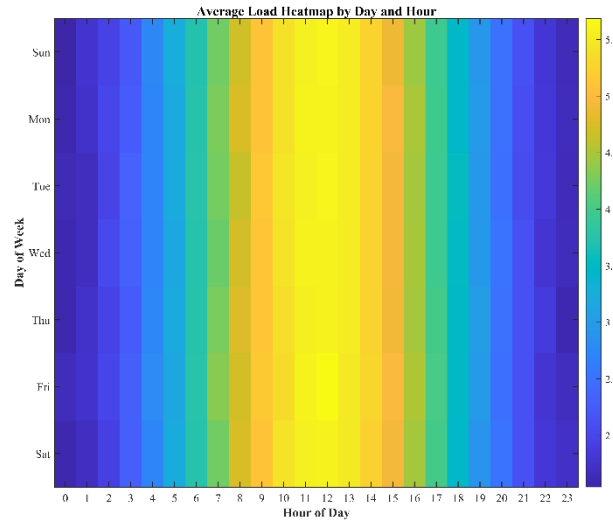


Figure 3. A heat map showing the periodic distribution of load by hour and day.

Figure 4 shows the relationship between solar irradiance and load using a scatter plot. This plot allows for a visual examination of the distribution pattern between solar irradiance values and active power consumption. The observed distribution suggests that it may be appropriate to evaluate environmental variables in the short-term load forecasting process. However, this relationship should be interpreted not as a causal effect but as an inter-variable relationship that can be taken into account in modeling.

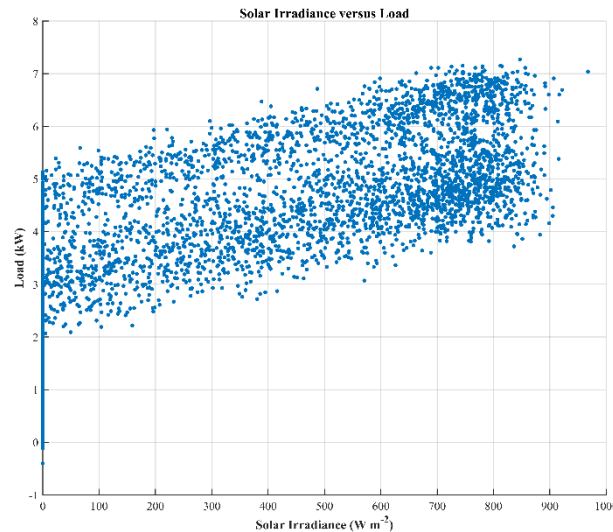


Figure 4. A scatter plot showing the relationship between solar irradiance and load.

In general, the results of the data analysis indicate that the load data exhibits time-dependent variations and diurnal cycle characteristics, and also displays a pattern related to certain electrical and environmental variables. These findings support the rationale for the multivariate time series modeling approach used in this study.

2.5. Modeling Approach

This study addresses the short-term load forecasting (STLF) problem, and the model inputs have been structured to include electrical, environmental, and temporal characteristics. Within this scope, a multivariate input structure was created by combining electrical variables

such as past active power consumption, voltage, frequency, power factor, reactive power, and distributed energy generation; environmental variables such as temperature, solar irradiance, wind speed, and humidity; and cyclical temporal characteristics derived from time-of-day information. The active power consumption variable was used both as an input variable representing historical load information and as the prediction target for the next time step. The general workflow of the data processing, feature engineering, modeling, and performance evaluation steps applied in this study is presented in Figure 5.

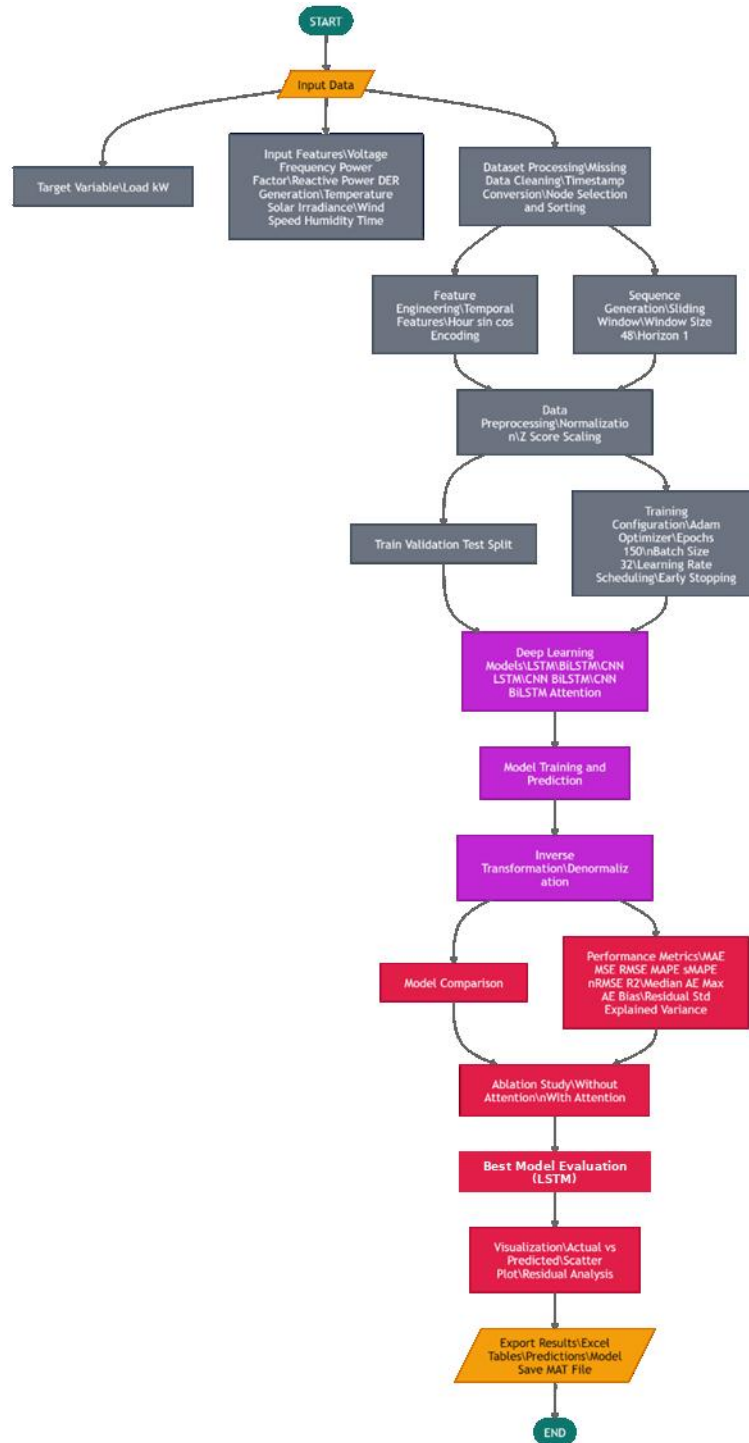


Figure 5. A general flowchart illustrating the data processing, modeling, and evaluation processes used in the study.

The time-series data was restructured using a sliding window approach to make it suitable for deep learning models. In this context, the window size was set to 48 time steps, and the prediction horizon was defined as 1 time step. Since the subset of the dataset under examination consists of 30-minute measurement intervals, 48 time steps correspond to a 24-hour observation window. Each sample generated is configured to predict active power consumption in the next 30-minute time step using multivariate observations from the previous 48 time steps.

In the current implementation, modeling and performance analysis were performed on the time series corresponding to the N01 node selected from the dataset. The time series associated with the selected Node_ID was sorted chronologically, and sliding window samples were generated from this node's time series. Thus, in each sample, the multivariate observations from the previous 48 time steps for the same node were used as input; the target value was defined as the active load value for the same node at the next time step. This approach allows the model to learn short-term temporal dependencies specific to the selected node.

2.6. Data Splitting and Training

Following the data scaling and sliding-window generation steps, the samples were divided into training (70%), validation (15%), and test (15%) subsets while preserving the chronological order. This means that the chronological nature of data is maintained throughout the data splitting step. Here, the training set is used to train the models, the validation set is used to monitor the training process, and the test set is used to measure the performance of the final model.

The optimization algorithm that was used to train the models was Adam. During the training phase, a maximum number of 150 epochs, a mini-batch size of 32, and an initial learning rate of 0.0005 were used. Further, the learning rate was reduced gradually, L2 regularization was used, and gradient thresholding technique was used. Apart from these, performance monitoring of the model is done using the validation data set, and early stopping method is used to preserve the generalization performance. The same process is used to train all types of models.

2.7. Performance Evaluation

Predictive performance of the proposed models was assessed using various performance metrics that are able to evaluate the level of error and explanatory power at once. Thus, MAE, MSE, RMSE, MAPE, symmetric MAPE (sMAPE), normalized RMSE (nRMSE), and the coefficient of determination (R^2) were used as performance metrics. MAE is the measure that evaluates the overall level of the model error, providing the average absolute error between predicted and actual data. MSE and RMSE enable assessing the level of the error magnitude distribution, giving larger weights to bigger errors. Finally, MAPE and symmetric MAPE (sMAPE) make possible the relative evaluation of the model performance by means of showing prediction error as a percentage. However, as the MAPE value may be numerically sensitive in case of the small or negative values of load, this metric was compared to RMSE, sMAPE, nRMSE, and R^2 . nRMSE helps in comparing models based on the normalization of RMSE

values depending on the data scale. At last, R^2 is the metric that shows how well the model is able to explain the variance of the dependent variable.

Thus, using these metrics together provides the possibility to compare models by not only the level of average error but also relative error, error dispersion, and explanatory power.

2.8. Model Comparison and Ablation Analysis

To compare the performance of short-term load forecasting models, several deep learning architectures were tested in this research work. In particular, LSTM, BiLSTM, CNN-LSTM, CNN-BiLSTM, and CNN-BiLSTM-Attention architectures were considered in this case. All models were trained on the same dataset, performed the same pre-processing steps, used the same sliding window structure, performed the same split of the data, and had the same training parameters. Such an approach can allow comparing the performance of these models more consistently.

In addition to the CNN-LSTM and CNN-BiLSTM architectures, which perform local pattern extraction with CNN and temporal modeling at the same time, LSTM and BiLSTM models, which are aimed at capturing temporal dependencies only, were tested in this paper. Furthermore, CNN-BiLSTM-Attention architecture, which implements the attention mechanism in the CNN-BiLSTM architecture, was considered in this paper as well. CNN-BiLSTM-Attention was not proposed as the main model in this paper; it was used to evaluate the influence of the increased complexity of the model and the attention component on the dataset.

An ablation analysis of the attention mechanism was also performed in this research work. To do this, the CNN-BiLSTM model, which does not contain the attention component, and the CNN-BiLSTM-Attention model, which contains the attention component, were compared. Thus, the influence of the attention component on the prediction accuracy was quantitatively estimated using error metrics and the R^2 value. This approach makes it possible to estimate the potential advantage of the increased model complexity on the low-voltage grid dataset.

Table 3 contains information about the main architectural and training hyperparameters of the compared models. The same optimizer, learning rate, mini-batch size, regularization, validation monitoring, and early stopping were used for all models in order to provide fair comparison. Attention-based model differs from the CNN-BiLSTM model by applying the sequence output from the BiLSTM layer and then performing the self-attention and last-step indexing.

Table 3. Hyperparameter settings of the compared models

Component / Parameter	LSTM	BiLSTM	CNN-LSTM	CNN-BiLSTM	CNN-BiLSTM-Attention
Input features	12	12	12	12	12
Window size	48	48	48	48	48
Forecasting horizon	1	1	1	1.00	1
LSTM / BiLSTM units	128	128	128	128	128
Recurrent output mode	Last	Last	Last	Last	Sequence

CNN layer 1	-	-	32 filters, kernel size 5	32 filters, kernel size 5	32 filters, kernel size 5
CNN layer 2	-	-	64 filters, kernel size 3	64 filters, kernel size 3	64 filters, kernel size 3
CNN padding	-	-	Same	Same	Same
Batch normalization	-	-	Yes	Yes	Yes
Attention layer	-	-	-	-	Self-attention, 4 heads, 128 channels
Last-step indexing	-	-	-	-	Yes
Dropout rate	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Fully connected layers	64 -> 1	64 -> 1	64 -> 1	64 -> 1	64 -> 32 -> 1
Activation function	ReLU	ReLU	ReLU	ReLU	ReLU
Optimizer	Adam	Adam	Adam	Adam	Adam
Maximum epochs	150	150	150	150	150
Mini-batch size	32	32	32	32	32
Initial learning rate	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Learning rate schedule	Piecewise	Piecewise	Piecewise	Piecewise	Piecewise
Drop factor / period	0.5 / 20 epochs	0.5 / 20 epochs	0.5 / 20 epochs	0.5 / 20 epochs	0.5 / 20 epochs
L2 regularization	1e-4	1e-4	1e-4	1e-4	1e-4
Gradient threshold	1	1	1	1	1
Validation frequency	20	20	20	20	20
Early stopping patience	15	15	15	15	15
Shuffle	Never	Never	Never	Never	Never

3. Results and Discussion

In this section, the short-term load forecasting performance of different deep learning models is evaluated comparatively. The findings are analyzed using error metrics and diagnostic analyses, and the impact of model complexity on forecasting performance is discussed.

3.1. Model Performance Comparison

All models have been trained using the same data splitting approach, preprocessing techniques, sliding windows and training parameters. This technique enables the consistent and comparative evaluation of the performance of different models. Performance results have been given in Table 4. The performance results obtained in this part of research were estimated using test examples from the selected N01 node.

Table 4. Model Performance Comparison

Model	LSTM	BiLSTM	CNN-LSTM	CNN-BiLSTM	CNN-BiLSTM-Attention
MAE	0.185926	0.189392	0.226637	0.207693	0.295788
MSE	0.053043	0.058475	0.081093	0.070239	0.156870
RMSE	0.230310	0.241816	0.284769	0.265026	0.396069
MAPE	10.565515	10.534878	11.491246	10.184426	20.719845
sMAPE	9.547691	9.481748	10.478627	9.700172	15.629238
nRMSE	7.699755	8.084405	9.520418	8.860368	13.241405
R ²	0.973531	0.970821	0.959534	0.964951	0.921721

MedAE	0.157690	0.141479	0.209521	0.185584	0.220041
MaxAE	0.565922	0.693024	0.757737	0.689961	0.951821
Bias	-0.015295	0.018160	-0.097933	-0.023285	-0.173733
ResidualStd	0.232458	0.243920	0.270491	0.267053	0.360046
ExplainedVariance	0.973648	0.970985	0.964320	0.965221	0.936783

From an analysis of Table 4, it can be said that the LSTM model is the most successful in terms of prediction performance. With MAE = 0.1859, RMSE = 0.2303, nRMSE = 7.6998, and $R^2 = 0.9735$, the LSTM model was the most balanced one among all models. In addition, the small values of MaxAE = 0.5659 and ResidualStd = 0.2325 show that the LSTM model is also a stable one in terms of forecasting stability and error dispersion.

The BiLSTM model produced results similar to those of the LSTM; in particular, it performed slightly better in terms of sMAPE and MedAE values. The CNN-BiLSTM model, on the other hand, produced the lowest value for the MAPE metric. However, when the RMSE, nRMSE, R^2 , MaxAE, and ResidualStd metrics are evaluated together, it becomes clear that the LSTM model generally offers a more reliable and balanced performance. This situation demonstrates that model success should be evaluated not based on a single metric, but by considering various error and explanatory metrics together.

The CNN-LSTM, CNN-BiLSTM, and CNN-BiLSTM-Attention models lagged behind the LSTM model in terms of overall error magnitude and explanatory power. In particular, the increase in the RMSE value to 0.3961 and the decrease in the R^2 value to 0.9217 in the CNN-BiLSTM-Attention model indicate that the increased architectural complexity resulting from the attention mechanism does not provide a performance advantage on this dataset. Overall, the findings reveal that an increase in model complexity does not always result in higher prediction accuracy and that model selection must be evaluated in conjunction with the structural characteristics of the dataset.

3.2. Prediction Performance Analysis

Predictive behavior of the LSTM model (which demonstrated the highest quality among all considered models) was estimated using the comparison of actual and predictive load values over the time series. Figure 6 shows the predictions obtained using the LSTM model along with the actual values of active power consumption for the chosen N01 node.

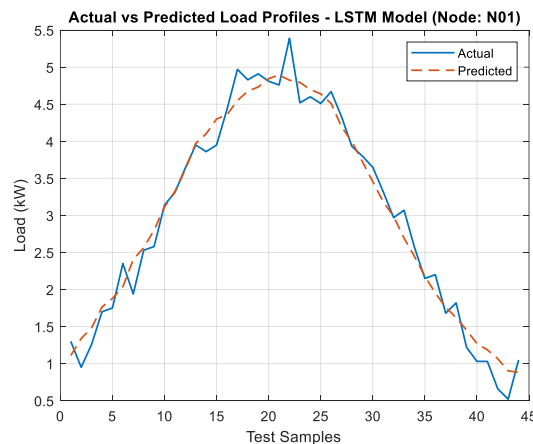


Figure 6. Comparison of actual and predicted load values for the LSTM model.

Based on Figure 6, one can note that the LSTM model successfully estimates the general tendency of load variation. Prediction values of the load follow its upward/downward tendencies and provide the results close to the real ones especially during moderate load values. However, some deviations occur near the points of peaks and troughs. This means that estimation of the fast increases/decreases might be complicated in case of short-term load forecasting problems. Smoother structure of the prediction curve compared with the actual curve in some areas suggests that despite the success in estimating the general load tendency, the model cannot reflect short-term sharp increases/decreases. This observation coincides with the performance characteristics shown in Table 4. The LSTM model provided the highest forecasting quality among the models compared, including $RMSE = 0.2303$ and $R^2 = 0.9735$; however, the deviations were still observed in the points with the highest variations. Thus, the analysis of the time series shown in Figure 6 shows that the LSTM model successfully estimated short-term load changes in the dataset of the low-voltage grid. This outcome supports the conclusion that more complicated CNN-based hybrid models and attention-based architecture do not provide the additional performance improvement over the LSTM on this dataset.

3.3. Regression Scatter Analysis

In order to further investigate the prediction accuracy of the LSTM model, the relationship between the actual load values and the predicted values was examined with the help of a scatter plot. Figure 7 demonstrates the distribution of the predicted load values by LSTM model and the actual load values of the chosen N01 node, as well as the 45° reference line.

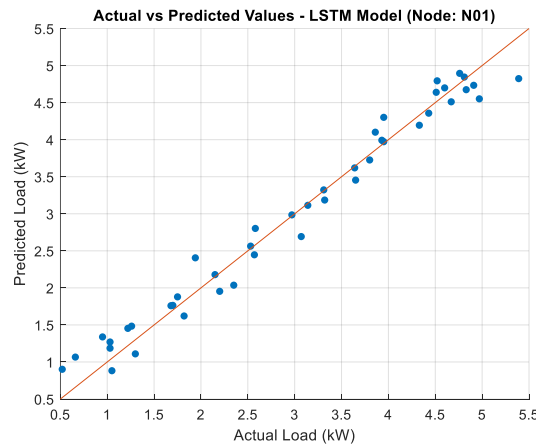


Figure 7. Scatter plot showing the relationship between actual and predicted load values for the LSTM model.

Based on the information provided by Figure 7, it can be seen that the majority of the data points gather around the 45° reference line. It means that LSTM model can predict close to actual values and deliver accurate predictions. Specifically, it was noticed that the predicted values are close to the reference line for low and medium loads.

At the same time, in some cases when high load is present, it was noticed that the data points are farther away from the reference line and the predicted values are even lower than the

actual ones. Thus, despite the successful capture of the overall trend, the model can provide certain deviations of the predicted values in case of peak load. This result is consistent with the findings of the comparison of the predictions in the peak and transition regions provided in Figure 6. Based on the analysis of the regression distribution, it can be concluded that LSTM model provides consistent predictions with high R^2 for the chosen N01 node.

3.4. Residual Analysis

Residual time series analysis was done in order to determine the behavior of prediction errors over time of the LSTM model. Figure 8 illustrates how the residual values, which represent differences between the predicted values using the LSTM model and the actual values, vary over time in the case of the selected N01 node.

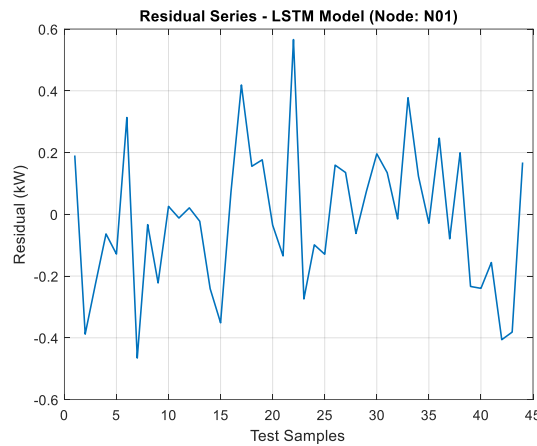


Figure 8. Residual time series plot for the LSTM model.

From Figure 8 it can be concluded that the residual values are generally centered around zero, which means that there is no clear tendency among them, thus, it can be assumed that the LSTM model does not have any systematic bias in its predictions. The fact that residual values are mostly kept within certain boundaries proves that the LSTM model successfully captures the overall tendency of the load.

However, the short-term increasing of errors takes place in some test samples. Such deviations mean that the model can be partially detached from the real values in the neighborhoods of peak and trough moments as well as in case of sudden change of the load. It should be noted that such conclusions correlate with the actual and predicted values comparison illustrated in Figure 6 and scatter plot in Figure 7. In summary, the residual analysis shows that the LSTM model demonstrates balanced error distribution free of systematic bias for the selected N01 node.

3.5. Ablation Analysis Results

In this section, the effect of the attention mechanism on model performance was also evaluated. Since the attention component was added to the CNN-BiLSTM architecture rather than the LSTM model, the ablation analysis was conducted between the CNN-BiLSTM and CNN-BiLSTM-Attention models. Thus, the contribution of the attention component alone to prediction performance was examined on the same hybrid architecture.

Table 5. Ablation analysis results

Ablation	MAE	MSE	RMSE	MAPE	sMAPE	nRMSE	R ²
Without_Attention	0.207693	0.070239	0.265026	10.184426	9.700172	8.860368	0.964951
With_Attention	0.295788	0.156870	0.396069	20.719845	15.629238	13.241405	0.921721

Upon examining Table 5, it can be seen that adding the attention mechanism to the CNN-BiLSTM architecture does not improve performance on this specific dataset. When the attention component was added, the RMSE value increased from 0.2650 to 0.3961, the MAPE value from 10.1844 to 20.7198, and the nRMSE value from 8.8604 to 13.2414. In contrast, the R² value decreased from 0.9650 to 0.9217.

These results indicate that the attention mechanism does not contribute to prediction accuracy in this specific data structure; rather, it leads to a significant increase in error metrics. Although LSTM delivered the best performance in the overall model comparison, this ablation analysis was conducted specifically to isolate the effect of the attention component on the CNN-BiLSTM architecture. The findings support the notion that more complex architectures do not automatically produce better results on every dataset.

3.6. Overall Evaluation

By analyzing the findings collectively, it can be stated that the LSTM model is the most efficient one in terms of general performance for making predictions on the data subset related to the selected N01 node. The LSTM model showed balanced and consistent performance among the other models with such performance indicators as MAE = 0.1859, RMSE = 0.2303, nRMSE = 7.6998, and R² = 0.9735. Additionally, the low performance indicators of MaxAE and ResidualStd show that the LSTM model also performed well in terms of error distribution.

The BiLSTM and CNN-BiLSTM models provided performance that was similar to the LSTM model's or even slightly better than the LSTM model's on some metrics. Specifically, the BiLSTM model showed the advantage in such metrics as sMAPE and MedAE, while the CNN-BiLSTM model demonstrated its advantage in the MAPE metric. Nevertheless, by analyzing all the performance indicators of RMSE, nRMSE, R², MaxAE, and ResidualStd together, it can be seen that the LSTM model is usually more reliable in terms of prediction performance. The findings show that the performance of models should not be evaluated based on only one indicator, but by considering several error and explanatory power measures together.

As a result of the ablation analysis, it was found out that the addition of the attention mechanism to the CNN-BiLSTM model's architecture did not improve its performance in this case. Thus, the findings confirm that the increase of the model's complexity does not always result in better prediction accuracy and the model performance depends on the structure of the dataset. However, the findings related to the prediction performance are only applicable to the N01 node and the time interval considered in this study.

4. Conclusion

In this study, the short-term load forecasting problem was addressed using a multivariate time series dataset from a low-voltage distribution network, and the LSTM, BiLSTM, CNN-LSTM, CNN-BiLSTM, and CNN-BiLSTM-Attention models were compared under the same

experimental conditions. Modeling and performance evaluation were performed on the time series of the N01 node selected from the dataset.

According to the results, the LSTM model was the most successful in terms of overall forecasting performance. With values of MAE = 0.1859, RMSE = 0.2303, nRMSE = 7.6998, and $R^2 = 0.9735$, the LSTM model provided lower error and a higher level of explanatory power compared to the other models. However, it was observed that the BiLSTM and CNN-BiLSTM models were able to produce results that were close to or slightly better than the LSTM in some relative error metrics. Therefore, it was demonstrated that model performance should be evaluated using multiple error and explanatory power metrics rather than a single metric.

Ablation analysis showed that adding an attention component to the CNN-BiLSTM architecture did not improve performance on this specific dataset. When the attention component was added, the RMSE value increased from 0.2650 to 0.3961, while the R^2 value decreased from 0.9650 to 0.9217. As a result, this finding proves that a more complex architecture does not always mean better performance and shows that the model performance is highly dependent on the structure of the dataset.

Thus, this research has proven that the choice of the model for short-term load forecasting in the low-voltage distribution network is associated not only with the complexity of the architecture of the model but also with the periodicity and variability of the dataset, as well as its time structure. Nevertheless, the findings of this research are limited to a certain N01 node, a part of the dataset, the time period, and particular configuration of the models.

References

1. Li, Z., Hurn, A. S., & Clements, A. E. (2017). Forecasting quantiles of day-ahead electricity load. *Energy Economics*, 67, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.08.002>
2. Sadaei, H. J., de Lima e Silva, P. C., Guimarães, F. G., & Lee, M. H. (2019). Short-term load forecasting by using a combined method of convolutional neural networks and fuzzy time series. *Energy*, 175, 365–377. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.081>
3. Ungureanu, S., Topa, V., & Cziker, A. C. (2021). Deep learning for short-term load forecasting—Industrial consumer case study. *Applied Sciences*, 11(21), 10126. <https://doi.org/10.3390/app112110126>
4. Shabbir, N., Kütt, L., Jawad, M., Husev, O., Rehman, A. U., Gardezi, A. A., Shafiq, M., & Choi, J.-G. (2022). Short-term wind energy forecasting using deep learning-based predictive analytics. *Computers, Materials & Continua*. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.024576>
5. Yaprakdal, F., & Varol Arısoy, M. (2023). A multivariate time series analysis of electrical load forecasting based on a hybrid feature selection approach and explainable deep learning. *Applied Sciences*, 13(23), 12946. <https://doi.org/10.3390/app132312946>
6. Ullah, I., Hasanat, S. M., Aurangzeb, K., Alhussein, M., Rizwan, M., & Anwar, M. S. (2023). Multi-horizon short-term load forecasting using hybrid of LSTM and modified split convolution. *PeerJ Computer Science*, 9, e1487. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1487>

7. Ibrahim, I. A., & Hossain, M. J. (2023). Short-term multivariate time series load data forecasting at low-voltage level using optimised deep-ensemble learning-based models. *Energy Conversion and Management*, 296, 117663. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117663>
8. Hu, H., & Yan, L. (2023). Short-term load forecasting method of power distribution station area integrating multiple temporal characteristics. In *Proceedings of the 6th International Conference on Machine Learning and Machine Intelligence (MLMI 2023)* (pp. 1–7). ACM. <https://doi.org/10.1145/3635638.3635641>
9. Morais, L. B. S., Aquila, G., de Faria, V. A. D., Lima, L. M. M., Lima, J. W. M., & de Queiroz, A. R. (2023). Short-term load forecasting using neural networks and global climate models: An application to a large-scale electrical power system. *Applied Energy*, 348, 121439. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121439>
10. Qin, B., Gao, X., Ding, T., Li, F., Liu, D., & Zhang, Z. (2024). A hybrid deep learning model for short-term load forecasting of distribution networks integrating the channel attention mechanism. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 18, 1770–1784. <https://doi.org/10.1049/gtd2.13142>
11. Li, J., Qiu, C., Zhao, Y., & Wang, Y. (2024). A power load forecasting model based on a combined neural network. *AIP Advances*, 14(4), 045231. <https://doi.org/10.1063/5.0185448>
12. Lu, W., & Chen, X. (2024). Short-term load forecasting for power systems with high-penetration renewables based on multivariate data slicing transformer neural network. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1355222. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1355222>
13. Tsegaye, S., Padmanaban, S., Bertling Tjernberg, L., & Fante, K. A. (2024). Short-term load forecasting for electrical power distribution systems using enhanced deep neural networks. *IEEE Access*, 12, 186856–186869. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3432647>
14. Li, H., Li, S., Wu, Y., Xiao, Y., Pan, Z., & Liu, M. (2024). Short-term power load forecasting for integrated energy system based on a residual and attentive LSTM-TCN hybrid network. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1384142. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1384142>
15. Wang, B., Wang, L., Ma, Y., Hou, D., Sun, W., & Li, S. (2025). A short-term load forecasting method considering multiple factors based on VAR and CEEMDAN-CNN-BILSTM. *Energies*, 18(7), 1855. <https://doi.org/10.3390/en18071855>
16. Patat, H. N., Erten, M. Y., & Aydilek, H. (2026). Multi-step hourly electrical load forecasting for a single household: A hybrid deep learning approach based on CNN, BiGRU, and attention mechanism. *International Journal of Energy Studies*, 11(1), 255–274. <https://doi.org/10.58559/ijes.1826202>
17. Unterluggauer, T., Rauma, K., Jarventausta, P., & Rehtanz, C. (2021). Short-term load forecasting at electric vehicle charging sites using a multivariate multi-step long short-term memory: A case study from Finland. *IET Electrical Systems in Transportation*, 11(4), 405–419. <https://doi.org/10.1049/els2.12028>

18. Shiblee, M. F. H., & Koukaras, P. (2025). Short-term load forecasting in the Greek power distribution system: A comparative study of gradient boosting and deep learning models. *Energies*, 18(19), 5060. <https://doi.org/10.3390/en18195060>
19. Zhou, L., Zhou, Y., Liu, L., & Zhao, X. (2024). A comparative study of different deep learning methods for time-series probabilistic residential load power forecasting. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1490152. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1490152>
20. “Low Voltage Smart Grid Planning Dataset,” Kaggle. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/zoya77/low-voltage-smart-grid-planning-dataset> (accessed Apr. 01, 2026).

BİR KİMYASAL TESİSTEKİ KOMPAZASYON VE UPS ÇALIŞMA KOŞULLARININ GÜÇ FAKTÖRÜ VE AKIM HARMONİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR

Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

anur@beu.edu.tr - <https://orcid.org/0009-0006-5671-6923>

ÖZET

Bu çalışmada, 160 kVA anma gücüne sahip bir besleme trafosu üzerinden enerjilendirilen bir kimyasal tesise ait yedi anlık güç kalitesi kaydı geriye dönük olarak incelenmiştir. Ana panonun yüklü çalışmasında reaktif güç kompanzasyonunun devrede ve devre dışı olduğu kayıtlar ile UPS besleme hattında arşivde normal, bypass/devre dışı ve online/çift dönüşüm olarak etiketlenen üç çalışma durumu karşılaştırılmıştır. Değerlendirmede toplam ve faz bazında güç faktörü, yer değiştirme güç faktörü, ortalama akım toplam harmonik distorsiyonu (THD_I), faz akımı aralık indeksi ve nötr iletken akımı kullanılmıştır. Kompanzasyonun devrede olduğu kayıta toplam güç faktörü 0,717, devre dışı olduğu kayıta ise 0,596 ölçülmüştür. Bununla birlikte, toplam aktif güçteki ve özellikle üçüncü faz aktif gücündeki büyük farklılıklar nedeniyle bu değişim yalnızca kompanzasyon işlemine atfedilememektedir. Kompanzasyonun devrede olduğu iki kayıta faz-1 güç faktörünün 0,987 olması, faz bazlı yük ve kompanzasyon dağılımının sahada doğrulanmasını gerektiren bir örüntü oluşturmaktadır; ancak mevcut veriler dengesiz kondansatör bağlantısını tek başına kanıtlamamaktadır. En yüksek değer bypass kaydında görülmesi ve UPS topolojisi ile ölçüm noktasının ayrıntılı olarak belgelenmemiş olması nedeniyle harmonik kaynağı yalnızca UPS redresörüne bağlanamamıştır. Ana panoda kaydedilen çok yüksek nötr akımlarının ise akım trafosu oranı, cihaz yapılandırması ve üçlü harmonik bileşenleri bakımından doğrulanması gerekmektedir. Gerilim harmonik distorsiyonu verileri kullanılmadığından ve kayıtlar aynı yük altında tekrarlanmamış anlık ölçümler olduğundan sonuçlar bir uygunluk testi değil, saha doğrulamasına yön veren tanısal bir vaka incelemesi olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güç kalitesi, güç faktörü, reaktif güç kompanzasyonu, kesintisiz güç kaynağı, akım harmonikleri, faz dengesizliği, nötr akımı

THE EFFECTS OF COMPENSATION AND UPS OPERATING CONDITIONS AT A CHEMICAL PLANT ON POWER FACTOR AND CURRENT HARMONICS

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR

Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

anur@beu.edu.tr - <https://orcid.org/0009-0006-5671-6923>

ABSTRACT

This study retrospectively evaluates seven snapshot power-quality records obtained at a chemical plant supplied by a 160 kVA transformer. Measurements recorded at the loaded main panel with reactive power compensation in service and out of service were compared with three operating conditions on the UPS feeder, labelled in the archived dataset as normal, bypass/out of service, and online/double-conversion. The assessment used total and phase power factor, displacement power factor, mean current total harmonic distortion (THD_I), a phase-current range index, and neutral-conductor current. The total power factor was 0.717 in the compensation-on record and 0.596 in the compensation-off record. However, substantial differences in total active power and especially in Phase 3 active power prevent this change from being attributed solely to compensation switching. A repeated Phase 1 power factor of 0.987 in the two compensation-on records indicates a phase-specific pattern that warrants field verification of load and capacitor-bank distribution, but it does not by itself prove an unbalanced capacitor connection. Because the highest THD_I occurred in the bypass record and the UPS topology and exact measurement location were not fully documented, the harmonic source cannot be isolated to the UPS rectifier alone. The unusually high neutral-current readings at the main panel also require verification of current-transformer ratios, instrument configuration, and triplen-harmonic components. Since voltage harmonic distortion was unavailable and the records were non-repeated snapshots obtained under different loading conditions, the findings are presented as a diagnostic case study rather than a standards-compliance assessment.

Keywords: Power quality, power factor, reactive power compensation, uninterruptible power supply, current harmonics, phase imbalance, neutral current

1. GİRİŞ

Kimya endüstrisindeki üretim tesisleri; motor sürücüler, pompalar, karıştırıcılar, ısıtma sistemleri, otomasyon ekipmanları ve bilgi işlem yükleri gibi farklı elektriksel karakteristiklere sahip yükleri aynı dağıtım sistemi üzerinde barındırmaktadır. Proses sürekliliği açısından kritik olan kontrol ve haberleşme yükleri çoğu tesiste kesintisiz güç kaynakları (UPS) üzerinden beslenmektedir. Güç elektroniği dönüştürücüler ve doğrultucu girişli yükler sinüzoidal olmayan akımlar çekebildiğinden, tesis içi akım harmoniklerinin ve güç faktörünün yük bileşimine bağlı olarak önemli ölçüde değişmesi beklenir [1,2].

Sinüzoidal olmayan çalışma koşullarında toplam güç faktörü yalnızca gerilim ile temel akım bileşeni arasındaki faz farkını ifade eden yer değiştirme güç faktörüne bağlı değildir; akım dalga şekli bozulması da toplam güç faktörünü azaltabilir. Bu nedenle toplam güç faktörü ile yer değiştirme güç faktörünün birlikte değerlendirilmesi, reaktif güç gereksinimi ile dalga şekli bozulmasının etkilerinin betimsel olarak ayrıştırılmasına yardımcı olur [3,4]. Bununla birlikte, iki farklı anda ölçülen güç faktörü değerlerinin doğrudan karşılaştırılabilmesi için yük büyüklüğü ve yük bileşiminin yeterince benzer olması gerekir.

Reaktif güç kompanzasyonu, temel frekanstaki endüktif reaktif güç talebini azaltarak yer değiştirme güç faktörünü iyileştirmek amacıyla uygulanır. Ancak kondansatör kademelerinin fazlara göre dağılımı, yüklerin dengesizliği, harmonik akımlar ve şebeke empedansı birlikte değerlendirilmediğinde faz bazlı aşırı veya yetersiz kompanzasyon ile rezonans riski ortaya çıkabilir [1,2]. Bu nedenle kompanzasyonun performansı yalnızca tek bir toplam güç faktörü değeri üzerinden değil, faz bazındaki aktif ve reaktif güçler, güç faktörü işaretleri, kondansatör kademe bilgileri ve eş zamanlı yük koşulları üzerinden incelenmelidir.

Üç fazlı dört telli sistemlerde nötr akımı, temel bileşendeki faz yük dengesizliğinin yanı sıra özellikle sıfır sıra karakteri gösteren üçlü harmoniklerden etkilenebilir. Doğrusal olmayan tek fazlı yüklerin yaygın olduğu sistemlerde faz akımları kısmen dengeli görünse bile nötr iletkende yüksek rms akımı oluşabilmektedir [5,6]. Bu nedenle sıra dışı nötr akımı kayıtları; faz akımlarının harmonik spektrumu, akım trafosu oranları, bağlantı polariteleri ve cihaz yapılandırması doğrulanmadan tek bir nedene bağlanmamalıdır.

UPS sistemlerinde giriş akımının harmonik karakteristiği; doğrultucu teknolojisine, giriş filtresine veya aktif güç faktörü düzeltme yapısına, yüklenme oranına, bypass bağlantısına ve ölçümün UPS girişinde ya da çıkışında yapılmasına bağlıdır. Geleneksel doğrultucu ve anahtarlamalı güç kaynağı yüklerinin harmonik akımları dağıtım iletkenleri ve transformatörlerde ek kayıplara neden olabilir [5,7]. Bununla birlikte, bypass durumunda ölçülen harmonik akım doğrudan UPS doğrultucusundan geçmeyebileceğinden, farklı UPS modları arasındaki karşılaştırmalarda enerji akış yolu ve bağlı yüklerin değişip değişmediği açıkça belgelenmelidir.

Harmonik uygunluk değerlendirmelerinde IEEE 519-2022, gerilim ve akım bozulma sınırlarını kullanıcı ortak bağlantı noktasında (PCC) ele almakta ve akım için THD yerine maksimum talep yük akımına dayalı toplam talep distorsiyonunu (TDD) esas almaktadır [8]. Harmonik ölçüm ve gruplama yöntemleri IEC 61000-4-7'de, güç kalitesi parametrelerinin ölçüm yöntemleri ise IEC 61000-4-30'da tanımlanmaktadır [9,10]. Bu nedenle kısa süreli, tekil ve yük

koşulları farklı kayıtlar standart uygunluğu göstermek için yeterli değildir; ancak olası sorunları belirlemek ve ayrıntılı saha ölçümlerini yönlendirmek için değerlidir.

Bu çalışmanın amacı, bir kimya tesisine ait arşivlenmiş sayısal ölçümler üzerinden (i) ana panonun yüklü durumunda kompanzasyonun devrede ve devre dışı olduğu kayıtlar arasındaki güç faktörü ve akım göstergesi farklılıklarını, (ii) UPS hattının arşivde farklı çalışma durumları olarak etiketlenen kayıtlarındaki güç faktörü, akım harmonikleri ve faz akımı dağılımını ve (iii) veri kalitesi ile ölçüm sınırlamalarını birlikte incelemektir. Çalışma nedensel bir deney veya standart uygunluk testi olarak değil, saha doğrulaması gerektiren bulguları ortaya koyan tanısal bir vaka analizi olarak tasarlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Tesis ve ölçüm kayıtları

Veri seti, kimya tesisini besleyen 160 kVA anma gücündeki transformatörle beslenen üç fazlı dört telli (3F+N) dağıtım sisteminde 2010 yılında kaydedilmiş yedi ayrı güç kalitesi ölçümünden oluşmaktadır. Kayıtlar anlık (snapshot) niteliktedir. Ham arşivde ölçüm cihazının marka-modeli, doğruluk sınıfı, akım trafosu (CT) oranları, örnekleme ve agregasyon süresi, UPS'in anma gücü ve topolojisi ile ölçüm probunun UPS girişinde mi yoksa çıkışında mı bulunduğu bilgileri yer almamaktadır. Bu nedenle söz konusu özellikler hakkında varsayım yapılmamış ve eksiklikler çalışmanın temel sınırlamaları arasında değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. İncelenen ölçüm noktaları ve karşılaştırmadaki rolleri

Kod	Arşivdeki ölçüm etiketi	Analizdeki kullanım
M1	Ana pano - Komp. ON (genel)	Faz bazlı güç faktörü ve bağlamsal karşılaştırma
M2	Ana pano yüklü iken - Komp. ON	Kompanzasyon ON/OFF karşılaştırması
M3	Ana pano yüklü iken - Komp. OFF	Kompanzasyon ON/OFF karşılaştırması
M4	UPS - Normal (Komp. ON)	UPS çalışma durumu karşılaştırması
M5	UPS - Bypass/Devre dışı (Komp. ON)	UPS çalışma durumu karşılaştırması
M6	UPS - Online/Çift dönüşüm (Komp. ON)	UPS çalışma durumu karşılaştırması
M7	İşletme geneli - Komp. ON	Baglamsal karşılaştırma

2.2. Ölçülen ve türetilen büyüklükler

Her ölçüm noktasında faz bazında aktif güç (P_1, P_2, P_3), reaktif güç (Q_1, Q_2, Q_3), görünür güç (S_1, S_2, S_3), rms akım (I_1, I_2, I_3), rms gerilim (U_1, U_2, U_3), nötr iletken akımı (I_N), tek sıra akım harmonik yüzdeleri (3.-21. dereceler), faz bazında ve toplam güç faktörü (PF), yer değiştirme güç faktörü (DPF) ve faz bazında toplam harmonik distorsiyon değerleri kaydedilmiştir. Çizelgelarda okunabilirliği artırmak amacıyla aktif güç kW, reaktif güç kvar olarak gösterilmiştir. Toplam aktif ve reaktif güç ile ortalama faz akımı aşağıdaki ilişkiler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$P_{top} = P1 + P2 + P3$$

$$Q_{top} = Q1 + Q2 + Q3$$

$$I_{ort} = (I1 + I2 + I3) / 3$$

$$THD_{I,ort} = (THD_{I1} + THD_{I2} + THD_{I3}) / 3$$

$$I_{aralık} (\%) = [(I_{maks} - I_{min}) / I_{ort}] \times 100$$

$$k_{boz} = PF_{top} / DPF_{top}$$

Burada $I_{aralık}$, üç faz akımı arasındaki aralığı ortalama akıma göre ifade eden çalışmaya özgü betimsel bir indekstir. Bu büyüklük IEC veya IEEE tarafından tanımlanmış standart bir akım dengesizliği göstergesi değildir ve negatif sıra/pozitif sıra akım oranının yerine kullanılmamıştır. k_{boz} oranı ise toplam güç faktörünün DPF'ye göre azalmasını betimlemek için kullanılmıştır; $1-k_{boz}$ değeri dalga şekli bozulmasıyla ilişkili göreceli farkı yaklaşık olarak ifade eder, ancak doğrudan enerji kaybı anlamına gelmez.

2.3. Analiz yaklaşımı ve değerlendirme sınırları

Her çalışma koşulu için yalnızca tek bir kayıt bulunduğundan istatistiksel hipotez testi uygulanmamış; mutlak değerler ve oranlar betimsel olarak karşılaştırılmıştır. Kompanzasyon ON/OFF kayıtları aynı yük altında alınmadığından, aralarındaki farklılıklar nedensel kompanzasyon etkisi olarak değil, kompanzasyon durumu ile yük bileşimindeki eş zamanlı değişimin birlikte oluşturduğu kayıt farklılıkları olarak yorumlanmıştır. Benzer şekilde UPS modları için de bağlı yüklerin sabit kaldığı ve ölçüm noktasının her kayıta aynı elektriksel konumu temsil ettiği doğrulanamamıştır.

IEEE 519-2022 açısından bir uygunluk değerlendirmesi yapılmamıştır. Bunun başlıca nedenleri; ölçüm noktasının PCC olarak doğrulanmamış olması, kısa devre akımı/maksimum talep yük akımı oranının ve TDD'nin bulunmaması, kayıtların anlık olması ve gerilim harmonik verilerinin kullanılamamasıdır. Sonuçlar, ayrıntılı ve kontrollü saha ölçümü öncesindeki tanısal göstergeler olarak ele alınmıştır.

2.4. Veri kalitesi kontrolleri

Yedi ölçüm noktasının tamamında gerilim toplam harmonik distorsiyonu (THD_U) değerleri 0,000 olarak kaydedilmiştir. Aynı arşivin diğer tesis bölümlerinde sıfırdan farklı THD_U değerleri bulunması, bu kayıtlardaki sıfırların fiziksel olarak kusursuz gerilim dalga şekli yerine ölçüm kanalının etkinleştirilmemiş veya dışa aktarımda kaydedilmemiş olabileceğini düşündürmektedir. Bu nedenle THD_U analize dahil edilmemiştir.

Ana pano kayıtlarındaki I_N değerlerinin ortalama faz akımını aşması fiziksel olarak mümkün olmakla birlikte, ölçülen THD_I düzeyleriyle birlikte değerlendirildiğinde ek doğrulama gerektirmektedir. Bu nedenle nötr akımı sonuçları nihai arıza tanısı olarak kullanılmamış; CT oranı, polarite, cihaz bağlantısı, ölçüm ölçeklemesi ve üçlü harmonik spektrumu bakımından doğrulanması gereken kayıtlar olarak raporlanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Ana pano yüklü durumda kompanzasyon ON/OFF kayıtları

Ana panonun yüklü çalışmasına ait kompanzasyon ON ve OFF kayıtları Çizelge 2'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2. Ana pano yüklü durumda kompanzasyon ON/OFF kayıtlarının karşılaştırılması

Ölçüm durumu	P_top (kW)	Q_top (kvar)	PF_top	DPF_top	THD_I_ort (%)	I_ort (A)	I_N (A)	I_aralık (%)
Komp. ON	66,453	57,337	0,717	0,718	3,99	139,9	250,84	34,32
Komp. OFF	46,816	49,548	0,596	0,597	3,44	115,1	219,40	10,42

Kompanzasyonun devrede olduğu kayıta PF_top 0,717, devre dışı olduğu kayıta 0,596'dır; mutlak fark 0,121'dir. Ancak aynı iki kayıta P_top 46,816 kW'tan 66,453 kW'a (%41,9), Q_top 49,548 kvar'dan 57,337 kvar'a (%15,7) ve I_ort 115,1 A'dan 139,9 A'a (%21,5) yükselmiştir. Dolayısıyla daha yüksek güç faktörü, reaktif gücün mutlak olarak azalmasıyla birlikte gerçekleşmemiştir. Bu bulgu, yük büyüklüğü ve bileşimi değişmeden yalnızca kompanzasyon anahtarlamasının incelendiği kontrollü bir karşılaştırmanın bulunmadığını göstermektedir.

Faz bazındaki kayıtlarda üçüncü faz aktif gücü kompanzasyon ON durumunda 20,018 kW, OFF durumunda 1,289 kW'tır. Yaklaşık on beş katlık bu fark, iki kayıt arasında üçüncü faza bağlı önemli bir yükün devreye girip çıkmış olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle PF_top değerindeki yükselmenin ne kadarının kondansatör kademesinden, ne kadarının yük bileşiminden kaynaklandığı mevcut veriyle ayrıştırılamamaktadır. Kompanzasyonun performansını doğrulamak için aynı yük altında kısa aralıklarla tekrarlanan ON/OFF ölçümü ve faz bazında Q işaretlerinin kaydı gereklidir.

THD_I_ort değeri kompanzasyon ON kaydında %3,99, OFF kaydında %3,44'tür. Aradaki 0,55 yüzde puanlık fark küçük olmakla birlikte yük koşulları aynı olmadığından kondansatör anahtarlamasına bağlanamaz. Kondansatörlerin harmonik davranış üzerindeki etkisini değerlendirmek için faz bazında harmonik spektrum, kademe gücü, sistem kısa devre empedansı ve rezonans taraması birlikte incelenmelidir [1,2].

I_N/I_ort oranı kompanzasyon ON kaydında yaklaşık 1,79, OFF kaydında 1,91'dir. Bu sıra dışı değerler, nötr iletkende yüksek sıfır sıra/üçlü harmonik akımı ihtimalini dışlamamakla birlikte, THD_I_ort değerlerinin yaklaşık %4 olması nedeniyle cihaz ölçeklemesi ve CT yapılandırmasının da kontrol edilmesini zorunlu kılmaktadır. I_aralık indeksinin ON kaydında %34,32, OFF kaydında %10,42 olması ise ölçüm anındaki faz yük dağılımının belirgin biçimde farklı olduğunu desteklemektedir.

3.1.1. Faz bazında güç faktörü örüntüsü

Ana panoya ait üç kayıttaki faz bazında güç faktörü değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Ana pano kayıtlarında faz bazında güç faktörü

Ölçüm noktası	PF1 (Faz-1)	PF2 (Faz-2)	PF3 (Faz-3)
Ana pano - Komp. ON (genel)	0,987	0,462	0,558
Ana pano yüklü - Komp. ON	0,987	0,631	0,532
Ana pano yüklü - Komp. OFF	0,791	0,946	0,052

Kompanzasyonun devrede olduğu iki ayrı kayıta PF1'in 0,987 olması, Faz-1'in diğer fazlardan farklı bir yük/reaktif güç davranışına sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yalnızca güç faktörü değerleri kondansatör grubunun tek faza veya dengesiz biçimde bağlandığını kanıtlamaz. Aynı örüntü; faz yüklerinin farklı olmasından, kademe kontrolünün faz ölçüm yönteminden, reaktif güç işaretinden veya ölçüm ölçeklemesinden de kaynaklanabilir. Kesin değerlendirme için faz bazında P ve Q değerleri, kondansatör kademe bağlantı şeması ve akım ölçümleri aynı zaman ekseninde incelenmelidir.

Kompanzasyon OFF kaydında PF3'ün 0,052 olması, üçüncü faz aktif gücünün yalnızca 1,289 kW olduğu bilgiyle birlikte değerlendirilmelidir. Çok düşük aktif güç ve görece yüksek reaktif/görünür güç koşullarında güç faktörü küçük değerlere düşebilir ve ölçüm belirsizliğine daha duyarlı hâle gelebilir. Bu nedenle PF3'teki keskin değişim, kompanzasyon bağlantısı hakkında tek başına bir kanıt olarak kullanılmamıştır.

3.2. UPS hattının farklı çalışma durumu kayıtları

UPS hattına ait üç kayıt, arşivdeki etiketler korunarak Çizelge 4 ve Çizelge 5'te karşılaştırılmıştır. IEC 62040-3, UPS performans ve çalışma durumlarının tanımlanmasında ayrıntılı işlevsel sınıflandırma kullanmaktadır [12]. Mevcut arşivde ise 'normal' ve 'online/çift dönüşüm' etiketlerinin elektriksel olarak nasıl ayrıldığı açıklanmadığından, bu adlandırmalar yalnızca kayıt etiketi olarak ele alınmıştır.

Çizelge 4. UPS çalışma durumu kayıtlarında güç faktörü ve akım harmonikleri

UPS kayıt etiketi	P_top (kW)	PF_top	DPF_top	PF/DPF	THD_I_ort (%)
Normal (Komp. ON)	4,602	0,870	0,931	0,935	37,51
Bypass/Devre dışı (Komp. ON)	6,012	0,890	0,977	0,911	42,51
Online/Çift dönüşüm (Komp. ON)	4,553	0,873	0,932	0,937	36,95

Çizelge 5. UPS çalışma durumu kayıtlarında akım dağılımı göstergeleri

UPS kayıt etiketi	I_ort (A)	I_N (A)	I_N/I_ort	I_aralık (%)
Normal (Komp. ON)	7,81	7,86	1,006	21,58
Bypass/Devre dışı (Komp. ON)	9,86	10,25	1,040	82,24

Online/Çift dönüşüm (Komp. ON)	7,75	7,74	0,999	22,48
--------------------------------	------	------	-------	-------

UPS hattındaki THD_{I,ort} değerleri tüm kayıtlarda yüksektir: normal durumda %37,51, bypass/devre dışı durumda %42,51 ve online/çift dönüşüm durumunda %36,95. Bu değerler ana panonun yüklü durumundaki %3,44-%3,99 aralığının yaklaşık on katıdır. Sonuç, UPS besleme kolunda güç elektroniği tabanlı ve doğrusal olmayan yük akımının baskın olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, harmonik kaynağın yalnızca UPS redresörü olduğu söylenemez. En yüksek THD_I değerinin bypass kaydında görülmesi; bağlı yüklerin kendi doğrultucuları, bypass enerji yolu, yüklenme oranı, önceden mevcut gerilim harmonikleri ve ölçüm konumu gibi etkenlerin birlikte incelenmesini gerektirir [5,7,11].

PF/DPF oranları normal, bypass ve online kayıtları için sırasıyla 0,935, 0,911 ve 0,937'dir. Buna göre toplam güç faktörünün DPF'ye göre göreceli farkı yaklaşık %6,5, %8,9 ve %6,3'tür. Bypass kaydında hem THD_I hem de bu göreceli farkın en yüksek olması, dalga şekli bozulmasının bu kayıta daha belirgin olduğunu göstermektedir; ancak farklı aktif güç ve olası farklı yük dağılımı nedeniyle bu sonuç UPS modunun tek başına etkisi şeklinde yorumlanmamıştır.

Bypass kaydında I_{aralık} %82,24'e ulaşmış, normal ve online kayıtlarda ise sırasıyla %21,58 ve %22,48 olmuştur. Ham faz akımları bypass durumunda Faz-1 için 14,67 A, Faz-2 için 8,37 A ve Faz-3 için 6,56 A'dır. Faz-1 akımının belirgin yüksekliği, bypass hattındaki yük dağılımının veya bağlantı güzergâhının diğer kayıtlardan farklı olabileceğine işaret etmektedir. Bu olasılık, UPS tek hat şeması ve eş zamanlı giriş-çıkış-bypass akım ölçümleriyle doğrulanmalıdır.

Normal ve online kayıtlarında P_{top}, I_{ort}, I_N, PF_{top}, DPF_{top} ve THD_{I,ort} değerlerinin birbirine yakın olması, bu iki kaydın benzer elektriksel çalışma noktalarını temsil etmiş olabileceğini düşündürmektedir. Ancak arşivde mod tanımı bulunmadığından bu benzerlik, iki modun genel olarak aynı güç kalitesi performansına sahip olduğu şeklinde genellenemez.

3.3. Ana pano genel kaydı ile işletme geneli kaydının karşılaştırılması

Ana pano genel kaydı ile işletme geneli kaydı, tesisdeki farklı ölçüm anlarına ilişkin bağlamsal referans sağlamak amacıyla Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Ana pano genel ve işletme geneli kayıtlarının karşılaştırılması

Ölçüm noktası	P _{top} (kW)	PF _{top}	DPF _{top}	THD _{I,ort} (%)	I _{ort} (A)
Ana pano - Komp. ON (genel)	16,999	0,669	0,674	11,83	36,81
İşletme geneli - Komp. ON	12,521	0,722	0,728	9,78	25,04

İşletme geneli kaydında PF_{top} 0,722 ile ana pano genel kaydındaki 0,669 değerinden daha yüksek, THD_{I,ort} ise %9,78 ile %11,83'ten daha düşüktür. Bununla birlikte aktif güç ve ortalama akım da farklıdır. Ölçüm noktalarının elektriksel kapsamı ve zamanları aynı olmadığından, bu farklar bir ekipman veya işletme durumunun etkisi olarak yorumlanmamış; tesisin değişken yük bileşimini gösteren iki ayrı gözlem olarak değerlendirilmiştir.

3.4. Standartlar açısından yorumlanabilirlik

Bu çalışmadaki THD_I değerleri, harmonik akımın yük akımına oranını göstermektedir. IEEE 519-2022'de PCC için akım sınırları TDD ve I_{sc}/I_L oranına göre belirlendiğinden, mevcut verilerle IEEE 519 uygunluğu hakkında 'uygun/uygun değil' kararı verilemez [8]. Ayrıca ana pano veya UPS hattının PCC olup olmadığı, I_L değeri ve sistem kısa devre akımı bilinmemektedir. Bu nedenle özellikle %37-%43 arasındaki UPS THD_I değerleri yerel yük akımının güçlü biçimde bozulduğunu göstermekle birlikte, tek başına şebeke emisyon sınırının aşıldığı anlamına gelmez.

IEC 61000-4-30:2025, güç kalitesi parametreleri için tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir ölçüm yöntemleri tanımlamaktadır [10]. Gelecek ölçümlerde cihaz sınıfı, agregasyon aralığı, senkronizasyon, kayıt süresi ve olay etiketleri belgelenmeli; harmonik bileşenler IEC 61000-4-7 yöntemine göre raporlanmalıdır [9]. UPS'in ürün seviyesindeki EMC ve performans özellikleri ise IEC 62040-2 ve IEC 62040-3 ile ilişkilidir [11,12]; bu standartlar saha PCC uygunluk değerlendirmesinin yerine geçmez.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir kimya tesisine ait yedi anlık ölçüm kaydı kullanılarak kompanzasyon durumu ve UPS hattındaki farklı çalışma etiketi kayıtları güç faktörü, akım harmonikleri, faz akımı dağılımı ve nötr akımı açısından yeniden değerlendirilmiştir. Kompanzasyon ON kaydında toplam güç faktörü OFF kaydından yüksek bulunmuştur. Ancak toplam aktif güçteki %41,9'luk artış ve üçüncü faz aktif gücündeki yaklaşık on beş katlık fark, söz konusu yükselmenin yalnızca kompanzasyona bağlanmasını engellemektedir. Reaktif gücün ON kaydında daha yüksek olması da aynı yük altında kontrollü bir anahtarlama deneyi bulunmadığını göstermektedir.

Kompanzasyonun devrede olduğu iki kayıta Faz-1 güç faktörünün 0,987 olarak tekrarlanması, faz bazlı yük ve reaktif güç dağılımının incelenmesi gereken bir örüntüdür. Bununla birlikte mevcut kayıtlar, kondansatör bankının dengesiz bağlandığını kesin olarak göstermemektedir. Pano şeması, kademe kontaktörleri, faz bazında P-Q işaretleri ve aynı anda ölçülen kondansatör akımları kontrol edilmeden bağlantı arızası tanısı konulmamalıdır.

UPS hattında %36,95-%42,51 aralığında ölçülen THD_I değerleri, ana pano yüklü kayıtlarından belirgin biçimde yüksektir ve bu hatta doğrusal olmayan yük akımının baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak en yüksek değer bypass kaydında görülmesi ve ölçüm noktasının ayrıntılı tanımlanmamış olması nedeniyle harmonik üretim yalnızca UPS redresörüne atfedilemez. Bypass kaydındaki %82,24'lük akım aralık indeksi, Faz-1 ağırlıklı yük dağılımının veya bypass enerji yolunun sahada incelenmesini gerektirmektedir.

Ana panodaki nötr akımlarının ortalama faz akımının yaklaşık 1,8-1,9 katı olması kritik bir doğrulama konusudur. İlk aşamada ölçüm cihazı bağlantısı, CT oranları ve polariteler kontrol edilmeli; ardından her fazın 3., 9., 15. ve 21. harmonik akımları ile nötr akımı eş zamanlı kaydedilmelidir. Doğrulama sonrasında yüksek nötr akımı teyit edilirse nötr iletken yüklenmesi, bağlantı noktaları ve termal durum ayrıca değerlendirilmelidir.

Gelecek saha çalışması için şu ölçüm düzeni önerilmektedir: (i) yükler sabit tutulurken kompanzasyon kademelerinin kontrollü ON/OFF anahtarlama, (ii) UPS giriş, çıkış ve bypass

hatlarında eş zamanlı ölçüm, (iii) en az bir haftalık sürekli kayıt ve yüklenme oranlarının kaydı, (iv) IEC 61000-4-7 uyumlu harmonik spektrum ve IEC 61000-4-30 uyumlu güç kalitesi ölçümü, (v) PCC'de I_{sc}/I_L oranı ve TDD hesabı ve (vi) pano tek hat şeması ile faz/kademe bağlantılarının doğrulanması. Harmonik azaltma için giriş reaktörü, pasif/aktif filtre veya aktif PFC'li UPS gibi çözümler ancak harmonik kaynağı ve sistem rezonans koşulları doğrulandıktan sonra teknik-ekonomik olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak çalışma, sınırlı ve tarihsel bir veri setinden kesin nedensel hükümler üretmek yerine, sahada doğrulanması gereken üç temel noktayı ortaya koymaktadır: yük koşullarından ayrıştırılmış kompanzasyon performansı, UPS bypass hattındaki faz dağılımı ve ana panodaki sıra dışı nötr akımı kayıtları. Bu yaklaşım, ölçümlerin kanıt gücünü aşmadan kullanılmasını ve sonraki güç kalitesi incelemesinin doğru noktalara yönlendirilmesini sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W. Electrical Power Systems Quality, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 2012.
- [2] Arrillaga, J., Watson, N. R. Power System Harmonics, 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester, 2003.
- [3] Emanuel, A. E. Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Transactions on Industry Applications, 40, 3, 869-876, 2004.
- [4] IEEE Std 1459-2025. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025.
- [5] Mansoor, A., Grady, W. M., Staats, P. T., Thallam, R. S., Doyle, M. T., Samotyj, M. J. Predicting the Net Harmonic Currents Produced by Large Numbers of Distributed Single-Phase Computer Loads. IEEE Transactions on Power Delivery, 10, 4, 2001-2006, 1995.
- [6] Desmet, J. J. M., Sweertvaegher, I., Vanalme, G., Stockman, K., Belmans, R. Analysis of the Neutral Conductor Current in a Three-Phase Supplied Network with Nonlinear Single-Phase Loads. IEEE Transactions on Industry Applications, 39, 3, 587-593, 2003.
- [7] Key, T. S., Lai, J.-S. Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building. IEEE Transactions on Industry Applications, 32, 5, 1017-1025, 1996.
- [8] IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022.
- [9] IEC 61000-4-7:2002+AMD1:2008. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and Measurement Techniques - General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation. International Electrotechnical Commission.
- [10] IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods. International Electrotechnical Commission.

[11] IEC 62040-2:2016. Uninterruptible Power Systems (UPS) - Part 2: Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements. International Electrotechnical Commission.

[12] IEC 62040-3:2021. Uninterruptible Power Systems (UPS) - Part 3: Method of Specifying the Performance and Test Requirements. International Electrotechnical Commission.

MISIR ENDÜSTRİYEL TESİSİNDE PROSES YÜKLERİ VE DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİNİN HARMONİK PERFORMANSININ ANALİZİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR

Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

anur@beu.edu.tr - <https://orcid.org/0009-0006-5671-6923>

ÖZET

Bu çalışmada, bir mısır işleme tesisinde gerçekleştirilen sayısal güç kalitesi ölçümleri kullanarak proses yükleri ile dağıtım transformatörlerinin harmonik performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Veri seti; dekantör, kazan, pompa, soğutma kulesi, santrifüj/sanitasyon hatları ve üretim sahası olmak üzere 12 proses ölçüm noktası ile TR1, TR2 ve TR4 dağıtım transformatörlerine ait 3 ölçüm kaydından oluşmaktadır. Değerlendirmede toplam aktif, reaktif ve görünür güç; ortalama faz akımı ve gerilimi; akım dengesizliği; nötr iletkeni akımı; toplam güç faktörü; yer değiştirme güç faktörü ve akım/gerilim toplam harmonik distorsiyonu (ITHD/UTHD) kullanılmıştır. Proses yüklerinde ITHD değerleri %8,15-%43,45, UTHD değerleri ise %3,78-%6,08 aralığında değişmiştir. Yüksek akımlı üretim sahası ve soğutma kulesi noktalarında ITHD görece düşük kalırken, SM-SAN2, SM-SAN3 ve SM-DEK.1 noktalarında daha yüksek akım distorsiyonu belirlenmiştir. SM-51/52/53 noktalarında toplam güç faktörü ile yer değiştirme güç faktörünün birbirine yakın olması, güç faktörü düşüklüğünde temel frekans reaktif bileşeninin baskın olduğunu göstermiştir. Buna karşılık SM-P6, SM-SAN2 ve SM-SAN3 noktalarında faz akımlarına göre olağan dışı yüksek nötr akımları kaydedilmiş ve bu değerlerin saha bağlantıları ile ölçüm yapılandırması açısından doğrulanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Transformatör kayıtları yaklaşık %0,09-%0,11 yüklenme düzeyinde alındığından, bu veriler tam yük harmonik performansını veya K-faktörü esaslı kapasite azaltma gereksinimini temsil etmemektedir. Ayrıca ölçümlerin anlık kayıtlar olması nedeniyle standartlara uzun süreli uygunluk sonucu çıkarılmamış; sürekli izleme ve tipik işletme yükünde yeniden ölçüm önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harmonik distorsiyon, dağıtım transformatörü, proses yükü, güç kalitesi, güç faktörü, nötr akımı

ANALYSIS OF THE HARMONIC PERFORMANCE OF PROCESS LOADS AND DISTRIBUTION TRANSFORMERS AT AN EGYPTIAN INDUSTRIAL FACILITY

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet NUR

Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

anur@beu.edu.tr - <https://orcid.org/0009-0006-5671-6923>

ABSTRACT

This study comparatively investigates the harmonic performance of process loads and distribution transformers using digital power quality measurements obtained from a corn processing plant. The dataset consists of 12 process measurement points associated with a decanter, boilers, a pump, a cooling tower, centrifuge/sanitation lines, and production areas, together with three records associated with the TR1, TR2, and TR4 distribution transformers. The assessment uses total active, reactive, and apparent power; average phase current and voltage; current unbalance; neutral conductor current; total power factor; displacement power factor; and total harmonic distortion of current and voltage (ITHD/UTHD). For the process loads, ITHD ranged from 8.15% to 43.45%, whereas UTHD ranged from 3.78% to 6.08%. ITHD was relatively low at the high-current production-area and cooling-tower points, while higher current distortion was observed at SM-SAN2, SM-SAN3, and SM-DEK.1. The close agreement between total and displacement power factors at SM-51/52/53 indicates that the low power factor at these points was dominated by the fundamental-frequency reactive component. In contrast, unusually high neutral currents relative to the phase currents were recorded at SM-P6, SM-SAN2, and SM-SAN3; these values require field verification of the measurement configuration and current-transformer connections. The transformer records were obtained at only approximately 0.09%-0.11% of rated loading and therefore cannot represent full-load harmonic performance or establish a K-factor-based derating requirement. Because the dataset consists of snapshot measurements, no long-term standards-compliance conclusion is drawn; continuous monitoring and repeat measurements under representative operating load are recommended.

Keywords: Harmonic distortion, distribution transformer, process load, power quality, power factor, neutral current

1. GİRİŞ

Endüstriyel üretim tesislerinde motorlar, pompalar, fanlar, santrifüjler, dekantörler, kazan yardımcı sistemleri ve otomasyon ekipmanları farklı çalışma karakteristiklerine sahip elektriksel yükler oluşturmaktadır. Bu yüklerin bir bölümü doğrudan şebekeye bağlı asenkron motorlardan oluşurken bir bölümü hız kontrol sürücüler, doğrultucular, anahtarlama güç kaynakları ve elektronik kontrol birimleri içerebilmektedir. Güç elektroniği tabanlı dönüştürücüler ile diğer doğrusal olmayan yükler, şebekeden sinüzoidal olmayan akım çekerek akım harmoniklerinin oluşmasına neden olur. Harmoniklerin düzeyi yalnızca yükün türüne değil; işletme noktası, yüklenme oranı, sürücü topolojisi, şebeke empedansı, kompanzasyon sistemi ve aynı barada çalışan diğer ekipmanlara da bağlıdır [1, 6].

Mısır ve nişasta işleme tesislerinde proses sürekliliği; öğütme, ayırma, santrifüjleme, pompalama, ısıtma ve soğutma gibi birbirini izleyen aşamalara bağlıdır. Dekantör ve santrifüj üniteleri, proses pompaları, kazan sistemleri ve soğutma kuleleri yüksek güçlü motor yükleriyle birlikte çeşitli kontrol ve yardımcı devreleri barındırabilir. Bu nedenle aynı tesis içinde yüksek temel bileşen akımı çeken motor ağırlıklı noktalar ile daha düşük akımlı fakat elektronik dönüştürücü etkisinin daha belirgin olduğu noktalar bir arada bulunabilir. Yalnızca toplam aktif güç veya toplam akım üzerinden yapılan bir değerlendirme, bu farklı yük davranışlarını ortaya koymak için yeterli değildir. Akım ve gerilim harmonik distorsiyonu, güç faktörü bileşenleri, faz dengesizliği ve nötr akımı birlikte incelendiğinde proses yüklerinin elektriksel karakteri daha bütüncül biçimde değerlendirilebilir.

Harmonik akımlar iletkenlerde ek I^2R kayıplarına, motor ve transformatörlerde ek ısınmaya, koruma ve ölçüm elemanlarında hatalı çalışmaya ve kompanzasyon kondansatörleriyle rezonans riskine yol açabilir. Özellikle sinüzoidal olmayan yük akımları transformatör sargılarındaki girdap akımı kayıplarını artırabilir ve termal kapasite değerlendirmesini etkileyebilir. IEEE C57.110, harmonikli yükleri besleyen transformatörlerin kapasitesinin değerlendirilmesine yönelik hesaplama yaklaşımını tanımlamakta; deneysel çalışmalar da harmonik spektrumunun transformatör kayıpları ve sıcaklık artışı üzerindeki önemini göstermektedir [5, 6]. Ancak bu tür bir kapasite veya derating değerlendirmesi, transformatörün temsil edici işletme yükündeki tekil harmonik akımlarının ve yüklenme koşullarının bilinmesini gerektirir.

Üç fazlı dört telli alçak gerilim sistemlerinde nötr akımı ayrıca kritik bir göstergedir. Faz yüklerinin dengesizliği temel frekansta sıfır bileşen akımı oluşturabilir; üçün katı harmonikler ise fazlarda aynı faz açısıyla bulunmaları hâlinde nötr iletkeninde aritmetik olarak toplanabilir. Bu nedenle nötr akımı, faz akımı dengesizliği ve 3., 9., 15. ve 21. dereceden harmonik bileşenlerle birlikte değerlendirilmelidir [7, 8]. Bununla birlikte, nötr akımının faz akımlarına göre fiziksel olarak olağan dışı büyüklüklere ulaşması; gerçek saha anomalisinin yanı sıra akım trafosu oranı, polarite, bağlantı veya ölçüm cihazının üç faz-dört telli sistem yapılandırması gibi ölçüm zinciri unsurlarının da doğrulanmasını gerektirir.

Harmonik performansın standartlara göre değerlendirilmesinde ölçüm noktası ve zaman birleştirme yöntemi belirleyicidir. IEEE 519-2022, gerilim ve akım bozulma hedeflerini yük terminallerinden bağımsız olarak ortak bağlantı noktasında (PCC) ele almakta ve akım değerlendirmesinde ITHD yerine maksimum talep akımına dayalı toplam talep distorsiyonunu

(TDD) kullanılmaktadır [1]. TS EN 50160 ise kullanıcı besleme terminalindeki gerilim karakteristiklerini belirli izleme süreleri ve istatistiksel yüzdelere üzerinden tanımlar [2]. IEC 61000-4-30 ve IEC 61000-4-7, güç kalitesi ile harmonik/interharmonik ölçümlerinin güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde gerçekleştirilmesine yönelik yöntemleri açıklamaktadır [3, 4]. Bu nedenle anlık saha kayıtları, ölçüm anındaki durumu göstermekle birlikte uzun süreli uygunluk beyanı için tek başına yeterli değildir.

Bu çalışmanın amacı, bir mısır tesisine ait mevcut sayısal güç kalitesi kayıtlarından yararlanarak 12 proses yükünün güç, güç faktörü, akım/gerilim harmonik distorsiyonu, akım dengesizliği ve nötr akımı profilini ortaya koymak; bu bulguları aynı veri setindeki üç dağıtım transformatörü kaydıyla ölçüm koşullarının izin verdiği ölçüde karşılaştırmaktır. Çalışmanın temel katkısı, proses noktalarındaki farklı elektriksel davranışların toplam ve yer değiştirme güç faktörleriyle ayrıştırılması, olağan dışı nötr akımı kayıtlarının ölçüm güvenilirliği açısından sorgulanması ve çok düşük yükte alınmış transformatör verilerinden tam yük performansı çıkarılmasının önlenmesidir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Veri Seti ve Ölçüm Noktaları

Çalışmada kullanılan veri seti, bir mısır işleme tesisinin üç fazlı dört telli besleme hatlarında gerçekleştirilen sayısal güç kalitesi ölçümlerinden oluşmaktadır. Toplam 15 ölçüm kaydının 12'si proses tarafındaki yük noktalarını, 3'ü ise tesisin dağıtım transformatörlerine ait kayıtları temsil etmektedir. Proses grubu; SM-SAN22, SM-51, SM-52, SM-53, SM-DEK.1, SM-KZN1, SM-KZN2, SM-P6, SM-SA3, SM-SAN2, SM-SAN3 ve SM-SK kodlu noktalardan oluşmaktadır. Bu noktalar veri setindeki tanımlamalara göre dekantör, kazan, pompa, soğutma kulesi, santrifüj/sanitasyon hatları ve üretim sahası yüklerini kapsamaktadır. SM-51, SM-52 ve SM-53 kodları orijinal kayıtlarda “TR.4 tarafı” ve “üretim sahası” olarak etiketlenmiş olmakla birlikte, transformatör kaydı değil proses tarafı yük ölçümü olarak sınıflandırılmıştır.

Transformatör grubu TR1 (1600 kVA), TR2 (1600 kVA) ve TR4 (2000 kVA) kayıtlarından oluşmaktadır. Veri setinde transformatörlerin primer/sekonder gerilimleri, bağlantı grupları, ölçümün primer veya sekonder tarafta yapıldığı nokta, akım trafosu oranları ve ölçüm sırasında bağlı yardımcı yüklerin ayrıntıları yer almamaktadır. Bu nedenle transformatör kayıtları yalnızca ölçülen elektriksel büyüklükler üzerinden değerlendirilmiş; ölçülen akımın doğrudan nüve mıknatıslanma akımı olduğu varsayılmamıştır.

2.2. Kaydedilen Elektriksel Büyüklükler

Her ölçüm noktasında üç faza ait aktif güç (P), reaktif güç (Q), görünür güç (S), efektif faz akımları ve faz gerilimleri kaydedilmiştir. Buna ek olarak nötr iletkeni akımı ($I_{n\text{ötr}}$), faz bazında 3., 5., 7., 9., 11., 13., 15., 17., 19. ve 21. dereceden akım harmonik yüzdeleri, akım ve gerilim toplam harmonik distorsiyonları (ITHD ve UTHD), toplam güç faktörü ($P_{F\text{tot}}$) ve yer değiştirme güç faktörü ($DP_{F\text{tot}}$) veri setinde yer almaktadır. $P_{F\text{tot}}$, aktif gücün toplam görünür güce oranını ve harmonik distorsiyonun etkisini birlikte içerirken; $DP_{F\text{tot}}$ temel bileşen gerilim ve akımı arasındaki faz farkına bağlı güç faktörünü ifade etmektedir. Bu iki göstergenin birlikte kullanılması, düşük güç faktörünün ağırlıklı olarak temel frekans reaktif bileşeninden mi yoksa dalga şekli distorsiyonundan mı etkilendiğinin yorumlanmasına yardımcı olmuştur.

2.3. Türetilmiş Göstergeler ve Hesaplama Yaklaşımı

Faz bazında kaydedilen değerlerden aşağıdaki toplam ve ortalama göstergeler türetilmiştir. A, B ve C indisleri üç fazı göstermektedir:

$$\begin{aligned}P_{top} &= P_A + P_B + P_C \\Q_{top} &= Q_A + Q_B + Q_C \\S_{top} &= S_A + S_B + S_C \\I_{ort} &= (I_A + I_B + I_C) / 3 \\U_{ort} &= (U_A + U_B + U_C) / 3\end{aligned}$$

Akım dengesizliği, faz akımlarının açıklığını ortalama faz akımına göre ifade edecek biçimde hesaplanmıştır:

$$\text{Akım dengesizliği (\%)} = [(I_{maks} - I_{min}) / I_{ort}] \times 100$$

Üç faz için kaydedilen toplam harmonik distorsiyon değerleri aritmetik ortalama alınarak tek bir ölçüm noktası göstergesine dönüştürülmüştür:

$$\begin{aligned}ITHD_{ort} &= (ITHD_A + ITHD_B + ITHD_C) / 3 \\UTHD_{ort} &= (UTHD_A + UTHD_B + UTHD_C) / 3\end{aligned}$$

Harmonik distorsiyonun güç faktörü üzerindeki göreceli etkisini incelemek amacıyla P_{Ftot}/DP_{Ftot} oranı kullanılmıştır. Bu oran 1'e yaklaştıkça toplam güç faktörü ile temel bileşen güç faktörü arasındaki fark azalmakta; oran düştükçe dalga şekli distorsiyonunun toplam güç faktörü üzerindeki etkisi artmaktadır. Bu oran, kaybın enerji veya güç cinsinden doğrudan yüzdesi olarak değil, iki güç faktörü göstergesi arasındaki göreceli farkın yorumlanması amacıyla kullanılmıştır.

2.4. Karşılaştırma ve Standartlara Göre Yorumlama

Proses noktaları öncelikle P_{top} , I_{ort} , P_{Ftot} , DP_{Ftot} , $ITHD_{ort}$, $UTHD_{ort}$ ve In_{otr} değerleri açısından karşılaştırılmıştır. $ITHD$ dağılımı; yüksek temel bileşen akımına sahip üretim ve soğutma yükleri ile daha düşük akımlı santrifüj/dekantör noktaları arasında incelenmiştir. P_{Ftot} ve DP_{Ftot} değerleri, güç faktörü düşüklüğünün reaktif ve distorsiyon bileşenlerini nitel olarak ayırmak için birlikte değerlendirilmiştir. Nötr akımı için In_{otr}/I_{ort} oranı dikkate alınmış; faz akımı dengesizliği ile üçün katı harmoniklerin olası katkısı sorgulanmıştır.

$UTHD$ sonuçları, TS EN 50160'ta alçak gerilim besleme gerilimi için yer alan %8 toplam harmonik distorsiyon seviyesiyle yalnızca gösterge amaçlı karşılaştırılmıştır [2]. Ölçümlerin anlık nitelikte olması nedeniyle bu karşılaştırma, standart uygunluk testi veya uzun süreli gerilim kalitesi beyanı olarak kullanılmamıştır. Benzer biçimde proses noktalarındaki $ITHD$ değerleri IEEE 519-2022 akım sınırlarıyla doğrudan karşılaştırılmamıştır; çünkü standart akım distorsiyonunu PCC'de, I_{sc}/I_L oranı ve TDD üzerinden değerlendirir [1].

2.5. Metodolojik Sınırlılıklar

- Veri seti zaman serisi yerine her ölçüm noktasına ait anlık veya kısa süreli özet kayıtlar içermektedir. Bu nedenle yüklerin vardiya, üretim miktarı, motor hız değişimi, kompanzasyon kademesi veya proses geçişleri sırasındaki değişken davranışı istatistiksel olarak incelenememiştir.

- Ölçüm cihazının marka/modeli, IEC 61000-4-30 ölçüm sınıfı, örnekleme ve birleştirme aralıkları, CT oranları ile ölçüm zincirinin belirsizliği mevcut dokümanda bulunmamaktadır. Özellikle nötr akımı anomalileri bu sınırlama dikkate alınarak yorumlanmıştır.
- Transformatör kayıtlarında ortalama akımlar 2,18-3,12 A, görünür güçler yaklaşık 1,48-2,10 kVA düzeyindedir. Bu değerler 1600-2000 kVA nominal güçlere göre yalnızca yaklaşık %0,09-%0,11 yüklenmeye karşılık gelmektedir. Ölçüm tarafı ve bağlı yük yapısı bilinmediğinden kayıtlar “mıknatıslanma akımı” olarak tanımlanmamış; tam yük ITHD, K-faktörü veya derating sonucu çıkarılmamıştır.
- Tekil harmonik yüzdeleri veri setinde bulunmakla birlikte bu bildirideki karşılaştırmalı ana tablolar toplam göstergelere odaklanmıştır. Nötr akımı yüksek bulunan noktalar için 3., 9., 15. ve 21. harmoniklerin fazör bilgileri ve saha bağlantıları ayrıca doğrulanmalıdır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Proses Yüklerinin Harmonik Performansı

Tesiste ölçülen 12 proses noktasına ait güç kalitesi büyüklükleri Tablo 1’de sunulmuştur. Proses grubunda ITHDort değerleri %8,15-%43,45, UTHDort değerleri %3,78-%6,08 ve toplam güç faktörü 0,581-0,933 aralığında değişmiştir.

Tablo 1. Proses yüklerinin güç kalitesi büyüklükleri

Ölçüm Noktası	P _{top} (kW)	I _{ort} (A)	PF _{tot}	DPF _{tot}	ITHD _{ort} (%)	UTHD _{ort} (%)	Inötr (A)
SM-SAN22	105,8	168,6	0,927	0,977	27,81	5,51	6,32
SM-51 (TR.4 tarafı)	157,0	313,9	0,742	0,745	9,27	4,10	9,74
SM-52 (Üretim sahası)	160,2	322,0	0,738	0,741	9,18	4,19	12,91
SM-53 (Üretim sahası)	149,0	308,1	0,733	0,736	9,64	3,78	11,31
SM-DEK.1 (Dekantör)	36,8	59,2	0,918	0,996	37,56	4,70	3,42
SM-KZN1 (Kazan.1, 250 kW)	1,0	1,6	0,920	0,945	18,74	4,75	0,17
SM-KZN2 (Kazan.2, 200 kW)	84,8	139,1	0,909	0,935	19,32	4,47	15,48
SM-P6 (TR.1'deki Pompa)	129,3	230,8	0,826	0,830	8,15	4,67	462,58
SM-SA3	134,2	212,8	0,933	0,979	26,11	6,08	8,49
SM-SAN2	19,6	49,8	0,581	0,647	43,45	5,12	94,95
SM-SAN3	50,0	120,8	0,612	0,655	32,55	5,25	239,57
SM-SK (Soğutma kulesi)	332,2	540,1	0,906	0,913	8,20	4,13	17,54

Tablo 1, proses noktalarının tek bir harmonik davranış göstermediğini ortaya koymaktadır. SM-SK, SM-51, SM-52, SM-53 ve SM-P6 noktalarında ortalama akımlar 230,8-540,1 A arasında olmasına rağmen ITHDort %8,15-%9,64 aralığında kalmıştır. Buna karşılık SM-SAN2, SM-SAN3 ve SM-DEK.1 noktalarında ITHDort sırasıyla %43,45, %32,55 ve %37,56 olarak ölçülmüştür. Yüksek temel bileşen akımı, aynı mutlak harmonik akımın yüzde olarak daha düşük görünmesine katkıda bulunabilir; ancak ekipmanların sürücü topolojisi ve çalışma durumu bilinmediğinden gözlenen fark yalnızca yük tipine bağlanmamıştır.

PFtot/DPFtot karşılaştırması güç faktörü düşüklüğünün niteliğini ayırmaktadır. SM-51, SM-52 ve SM-53 noktalarında oranlar yaklaşık 0,996, 0,996 ve 0,996'dır. Bu nedenle toplam güç faktörünün 0,733-0,742 aralığında kalmasında harmonik distorsiyondan çok temel bileşen reaktif gücünün etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu noktalar için kompanzasyon gereksinimi değerlendirilebilir; ancak UTHD'nin %3,78-%4,19 ve ITHD'nin yaklaşık %9 düzeyinde olması nedeniyle kondansatör kademeleri şebeke empedansı ve olası rezonans frekansları dikkate alınarak tasarlanmalıdır.

SM-SAN2 ve SM-SAN3'te PFtot/DPFtot oranları sırasıyla yaklaşık 0,898 ve 0,934'tür. Bu değerler distorsiyonun toplam güç faktörünü azalttığını göstermekle birlikte DPFtot değerlerinin de düşük olması (0,647 ve 0,655), temel frekans reaktif güç ihtiyacının ayrıca önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle yalnızca harmonik filtre veya yalnızca klasik kompanzasyon yerine, reaktif güç ve harmonik azaltma gereksinimlerinin birlikte incelendiği bir çözüm yaklaşımı daha uygundur. SM-DEK.1'de DPFtot 0,996 iken PFtot 0,918 ve ITHDort %37,56'dır; bu nokta ise temel bileşende düşük reaktif güç fakat belirgin dalga şekli distorsiyonu gösteren farklı bir yük profiline sahiptir.

Nötr akımı bakımından SM-P6, SM-SAN2 ve SM-SAN3 açık biçimde diğer noktalardan ayrılmaktadır. Bu noktalarda Inötr/Iort oranı sırasıyla yaklaşık 2,00, 1,91 ve 1,98'dir. Üç farklı ölçümde oranın yaklaşık iki kat düzeyinde tekrarlanması, yalnızca normal yük dengesizliğiyle açıklanamayacak bir duruma işaret etmektedir. Mevcut kayıtlarda SM-P6 ve SM-SAN3 için hesaplanan faz akımı dengesizlikleri görece düşüktür; ayrıca yalnızca 3. harmonik yüzdesinin sıfıra yakın olması 9., 15. ve 21. harmoniklerin katkısını dışlamaz. Bununla birlikte ölçüm cihazı ve nötr CT ölçek bilgileri bulunmadığından bu değerler gerçek nötr aşırı akımı olarak kabul edilmeden önce CT oranı, polarite, kanal eşleştirmesi ve 3P4W cihaz yapılandırması sahada doğrulanmalıdır.

3.2. Dağıtım Transformatörlerinin Harmonik Performansı

TR1, TR2 ve TR4 dağıtım transformatörlerine ait mevcut ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Tablodaki güç ve güç faktörü değerleri, kayıtların nominal transformatör gücüne göre çok küçük bir yüklenme düzeyinde alındığını göstermektedir.

Tablo 2. Dağıtım transformatörlerine ait güç kalitesi kayıtları (çok düşük yük koşulu)

Transformatör	P _{top} (W)	I _{ort} (A)	P _F _{tot}	D _P _F _{tot}	I _{THD} _{Dort} (%)	U _{THD} _{Dort} (%)	Inötr (A)
TR1 - 1600 kVA	1.525	2,27	0,993	0,999	9,42	4,79	0,19
TR2 - 1600 kVA	1.469	2,18	0,993	0,998	9,20	4,74	0,19
TR4 - 2000 kVA	2.084	3,12	0,992	0,999	4,82	3,64	0,87

Kayıtlardaki görünür güçler yaklaşık 1,48-2,10 kVA düzeyinde olup nominal güçlere oranlandığında TR1 ve TR2 için yaklaşık %0,09, TR4 için yaklaşık %0,11 yüklenmeye karşılık gelmektedir. Bu kadar düşük yüklenme altında yüzde cinsinden ITHD, küçük temel bileşen akımına bölündüğü için mutlak harmonik akımın etkisini olduğundan daha baskın gösterebilir. Bu nedenle TR1 ve TR2'deki yaklaşık %9 ITHD değerleri tek başına transformatörün harmonikli yük altında termal olarak zorlandığını göstermez.

P_F_{tot} değerlerinin 0,992-0,993 ve D_P_F_{tot} değerlerinin 0,998-0,999 olması, kayıtların klasik anlamda yüksek reaktif bileşenli boşa mıknatıslanma akımı olarak yorumlanmasını desteklememektedir. Ölçüm tarafı ile bağlı küçük yüklerin niteliği bilinmediğinden bu yüksek güç faktörlerinin nedeni kesinleştirilememiştir. Dolayısıyla mevcut veriler, transformatör nüvesinin doğrusal olmayan mıknatıslanma karakteristiğini doğrulayan doğrudan bir kanıt olarak kullanılmamıştır.

U_{THD}_{Dort} değerleri %3,64-%4,79 aralığındadır ve ölçüm anlarında %8 gösterge seviyesinin altında kalmıştır. Ancak transformatörlerin tam yük altındaki harmonik akımları, tekil harmonik spektrumu ve sargı kayıpları bilinmediğinden IEEE C57.110 kapsamında K-faktörü veya derating hesabı yapılamaz [5]. Temsil edici değerlendirme için ölçümlerin proses hatları normal işletmedeyken, transformatör giriş ve/veya çıkış tarafı açıkça belirtilerek ve tekil harmonik akımlar amper cinsinden kaydedilerek tekrarlanması gerekir.

3.3. Proses Yükleri ile Transformatör Kayıtlarının Karşılaştırılması

Proses noktalarının ortalama U_{THD}_{Dort} değeri %4,73 (aralık %3,78-%6,08), transformatör kayıtlarının ortalaması ise %4,39'dur (aralık %3,64-%4,79). İki grubun ölçüm anlarındaki gerilim distorsiyonu benzer mertebededir. Bu durum, aynı tesis içindeki farklı noktalarda gerilim dalga şeklinin ortak şebeke koşullarından etkilenebileceğini düşündürmektedir; ancak eş zamanlılık bilgisi ve şebeke tek hat modeli bulunmadığından kaynağın üst şebeke olduğu kesin olarak ileri sürülemez.

Her iki gruptaki U_{THD} değerleri ölçüm anında %8'in altında kalmıştır. Bununla birlikte TS EN 50160 değerlendirmesi, kullanıcı besleme terminalinde belirli bir izleme süresi boyunca elde edilen 10 dakikalık değerlerin istatistiksel dağılımına dayanır. Bu nedenle sonuç yalnızca “incelenen kayıtların %8'in altında olduğu” biçiminde ifade edilebilir; tesisin standarda sürekli uygun olduğu sonucu çıkarılamaz [2, 3].

ITHD bakımından proses noktaları ile transformatör kayıtlarının doğrudan sıralanması metodolojik olarak uygun değildir. Proses ölçümleri çalışan yükleri temsil ederken transformatör kayıtları yaklaşık %0,1 yüklenmede alınmıştır. Ayrıca IEEE 519-2022’de akım sınırları ekipman terminalindeki ITHD’ye göre değil PCC’deki TDD ve I_{sc}/I_L oranına göre belirlenmektedir [1]. Bu nedenle çalışmadaki ITHD değerleri yüklerin karşılaştırmalı karakterizasyonu için kullanılmış, standart uygunluk ölçütü olarak kullanılmamıştır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir mısır tesisine ait mevcut güç kalitesi kayıtlarının yeniden ve ihtiyatlı biçimde değerlendirilmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Proses yüklerinde ITHD %8,15-%43,45 arasında geniş bir dağılım göstermiştir. SM-SAN2, SM-SAN3 ve SM-DEK.1 noktaları akım distorsiyonunun en yüksek olduğu ölçüm noktalarıdır; buna karşılık yüksek akımlı üretim sahası, pompa ve soğutma kulesi kayıtlarında ITHD yaklaşık %8-%10 düzeyinde kalmıştır.
- SM-51, SM-52 ve SM-53 noktalarında P_{Ftot} ile DP_{Ftot} arasındaki fark çok küçüktür. Bu nedenle düşük güç faktörünün temel nedeni harmoniklerden çok temel frekans reaktif güç bileşenidir. Kompanzasyon tasarımında mevcut harmonik arka planı ve rezonans riski dikkate alınmalıdır.
- SM-SAN2 ve SM-SAN3’te hem DP_{Ftot} düşük hem de P_{Ftot}/DP_{Ftot} oranı 1’den belirgin biçimde küçüktür. Bu noktalar için reaktif güç kompanzasyonu ile harmonik azaltma seçenekleri birlikte değerlendirilmelidir. SM-DEK.1’de ise DP_{Ftot} ’un 0,996 ve ITHD’ün %37,56 olması, distorsiyon ağırlıklı farklı bir profil göstermektedir.
- SM-P6, SM-SAN2 ve SM-SAN3 noktalarında $I_{n\acute{o}tr}/I_{ort}$ oranı yaklaşık iki düzeyindedir. Bu kayıtlar normal faz dengesizliğiyle tek başına açıklanamamaktadır. Nötr CT oranı ve polaritesi, cihazın 3P4W yapılandırması, kanal eşleştirmesi ve 3., 9., 15. ve 21. harmonik fazörleri sahada doğrulanmalıdır.
- TR1, TR2 ve TR4 kayıtları nominal gücün yaklaşık %0,09-%0,11’i düzeyinde alınmıştır. Ölçüm tarafı bilinmediği için bu akımlar mıknatıslanma akımı olarak tanımlanmamış; mevcut verilerden tam yük harmonik davranışı, K-faktörü veya derating gereksinimi çıkarılmamıştır.
- İncelenen tüm UTHD kayıtları ölçüm anında %8’in altında kalmıştır. Ancak veriler anlık olduğundan bu bulgu TS EN 50160’a uzun süreli uygunluk beyanı değildir. IEC 61000-4-30’a uygun sınıfı belirlenmiş bir cihazla en az bir haftalık sürekli izleme yapılması ve sonuçların 10 dakikalık birleştirme aralıkları üzerinden değerlendirilmesi önerilmektedir.
- IEEE 519-2022 açısından akım harmonik uygunluğunun belirlenebilmesi için PCC açıkça tanımlanmalı; kısa devre akımı, maksimum talep yük akımı, TDD ve tekil harmonik akımlar birlikte hesaplanmalıdır. Transformatör değerlendirmesi ise normal işletme yükünde alınan amper cinsinden harmonik spektrumuyla tekrarlanmalıdır.

KAYNAKÇA

- [1] IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022.
- [2] TS EN 50160 / EN 50160:2022. Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks. CENELEC / Türk Standardları Enstitüsü.
- [3] IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods, 4th ed. International Electrotechnical Commission, 2025.
- [4] IEC 61000-4-7:2002+A1:2008. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and Measurement Techniques - General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation. International Electrotechnical Commission.
- [5] IEEE Std C57.110-2018. IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.
- [6] Yaghoobi, J., Alduraibi, A., Martin, D., Zare, F., Eghbal, D., Memisevic, R. Impact of High-Frequency Harmonics (0-9 kHz) Generated by Grid-Connected Inverters on Distribution Transformers. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 122, 106177, 2020.
- [7] Dovgun, V., Temerbaev, S., Chernyshov, M., Novikov, V., Boyarskaya, N., Gracheva, E. Distributed Power Quality Conditioning System for Three-Phase Four-Wire Low Voltage Networks. Energies, 13, 18, 4915, 2020.
- [8] Chicco, G., Mazza, A. 100 Years of Symmetrical Components. Energies, 12, 3, 450, 2019.

RÜZGAR VE GÜNEŞ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ İÇİN İZLEME ARAYÜZÜ TASARIMI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Öğrencisi, Tuncay Esenel

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, tuncayesenel@gmail.com - 0009-0002-2788-9498

Elektrik Elektronik Mühendisliği Öğrencisi, Eren Mutlu

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, erenmutlu11404@gmail.com - 0009-0005-9628-8989

Dr. Öğr. Üyesi, Murat Erhan ÇİMEN

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, muratcimen@subu.edu.tr -000000021793485X

ÖZET

Bu çalışmada, rüzgâr ve güneş enerjisi tabanlı hibrit bir güç üretim sisteminin parametrelerini gerçek zamanlı olarak takip etmek amacıyla açık kaynak kodlu ve düşük maliyetli bir izleme arayüzü tasarlanmıştır. Sistem simülasyonları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilirken, verilerin görselleştirilmesi ve kullanıcı etkileşimi için Python programlama dili kullanılmıştır. İki farklı platform arasındaki veri akışı, TCP/IP protokolü ve Socket kütüphanesi kullanılarak yerel ağ (localhost) üzerinden sağlanmıştır. Tasarlanan sistemde, MATLAB/Simulink bir istemci (client) gibi davranarak simülasyon verilerini paketleyip gönderirken, Python tabanlı arayüz bir sunucu (server) gibi çalışarak bu verileri almakta ve işlemektedir. Kullanıcı arayüzü (GUI) tasarımı için Tkinter kütüphanesi, anlık grafik çizimleri için ise Matplotlib kütüphanesi tercih edilmiştir. Ayrıca, veri akışının sürekliliğini sağlamak ve arayüzde donmaların önüne geçmek amacıyla çoklu iş parçacığı (threading) yapısı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen arayüzün, hibrit enerji sistemine ait gerilim, akım ve güç verilerini minimum gecikme ile görselleştirdiğini ve ticari SCADA sistemlerine alternatif, esnek bir izleme çözümü sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit Enerji Sistemi, MATLAB/Simulink, Python, TCP/IP Haberleşme, Gerçek Zamanlı İzleme, GUI Tasarımı.

1. GİRİŞ

Günümüzde artan enerji talebi ve fosil yakıtların çevresel etkileri, araştırmacıları ve endüstriyi yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Ancak güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının en büyük dezavantajı, meteorolojik koşullara bağlı olan kesintili (intermittent) üretim karakteristiğidir. Güneş enerjisinin sadece gündüz saatlerinde kullanılabilmesi veya rüzgârın değişken yapısı, enerji arz güvenliğini tehdit eden unsurlardır. Bu problemin aşılması için farklı karakteristikteki kaynakların (Güneş ve Rüzgâr) bir araya

getirildiği "Hibrit Enerji Sistemleri" büyük önem taşımaktadır. Bu sistemlerin verimli çalışabilmesi ise kaynaklardan maksimum gücün çekilmesini sağlayan MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) algoritmalarına ve sistemin anlık durumunun izlenebildiği gelişmiş arayüz tasarımlarına bağlıdır. Özellikle laboratuvar ortamında veya endüstriyel prototipleme süreçlerinde, sistem verilerinin anlık olarak izlenmesi, analiz edilmesi ve görselleştirilmesi, sistem güvenliği ve verimliliği açısından kritik bir gerekliliktir. Ticari SCADA sistemlerinin yüksek maliyetleri göz önüne alındığında, açık kaynak kodlu ve esnek yazılım tabanlı izleme arayüzlerinin geliştirilmesi, mühendislik eğitimi ve uygulamaları için stratejik bir öneme sahiptir.

Literatürde yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak ve güç kalitesini iyileştirmek üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Güç elektroniği devrelerinin temelleri ve yarı iletken teknolojileri üzerine Arifoğlu [1] ve Rashid [7] tarafından yapılan çalışmalar, dönüştürücü tasarımları için temel referansları oluşturmaktadır. DC/DC dönüştürücülerin pratik uygulamaları ve ipuçları konusunda Roberts [12] tarafından sunulan bilgiler, tasarım süreçlerinde yol gösterici olmuştur.

Güneş enerjisi sistemlerinde verimliliğin anahtarı olan MPPT teknikleri üzerine Boubaker [6] ve Podder ve ark. [9] kapsamlı tarama çalışmaları yapmış, farklı algoritmaların avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Özellikle parçalı gölgelenme durumlarında sistem verimini korumak adına Büyükgözel [5] ve Uzundağ [14] hibrit MPPT yöntemleri önermişlerdir. Dönüştürücü topolojileri açısından incelendiğinde; Sevim ve Bozkurt [11] DA-DA düşürücü dönüştürücülerin kontrolünü incelerken, Bellinaso ve ark. [8] PV uygulamaları için kaskat MPPT kontrolcü yapılarını ve Boost dönüştürücü uygulamalarını ele almışlardır. Mohamed [13] ise PV sistemler için Boost dönüştürücü tabanlı MPPT optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Teke ve ark. [15] farklı MPPT denetleyicilerinin performanslarını karşılaştırarak en uygun kontrol yöntemlerinin belirlenmesine katkı sağlamışlardır.

Hibrit sistemlerde ve rüzgâr enerjisi uygulamalarında ise Yağmur [18], rüzgâr türbinlerinde kanat kütle dağılımının enerji verimliliğine etkisini incelemiştir. Sistemin yük üzerindeki etkileri konusunda Saeed ve Farsadi [3], farklı MPPT yöntemlerinin doğrusal ve doğrusal olmayan yükler üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Enerji depolama ve dalgalanmalarla başa çıkma konusunda Atteieh [4], hibrit depolama sistemleri üzerine çalışmıştır.

Sistemin şebeke veya yük tarafındaki güç kalitesi de önemli bir parametredir. Nor ve Abdullah [2] ile Aslan [10], hibrit elektriksel sistemlerde güç kalitesinin iyileştirilmesi ve harmonik filtre uygulamaları üzerine yöntemler geliştirmişlerdir. Son aşama olan evirici (inverter) tasarımı konusunda ise Çayır ve Özbay [16] sulama sistemleri için üç fazlı evirici tasarımı yaparken, Haque ve ark. [17] maliyet etkin evirici tasarımı ve uygulaması üzerine odaklanmışlardır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, genellikle Buck veya Boost gibi tek yönlü gerilim dönüşümü sağlayan topolojilerin yaygın olduğu görülmektedir. Ancak hibrit sistemlerde giriş gerilimi, batarya veya bara geriliminin altına düşebilmekte veya üstüne çıkabilmektedir. Bu çalışmada, literatürdeki bu gereksinimi karşılamak üzere hem yükseltici hem de düşürücü olarak çalışabilen SEPIC topolojisi MPPT katmanında tercih edilmiştir. Ayrıca, rüzgâr ve güneş gibi iki farklı karakteristikteki kaynağın enerjisi, kaskat bağlı Buck-Boost regülatörler ile ortak bir DA barada birleştirilmiş ve ESP32 mikrodenetleyicisi ile kontrol edilmiştir. Sistemin izlenebilirliğini artırmak adına Python tabanlı özgün bir arayüz tasarlanarak, TCP/IP protokolü üzerinden simülasyon verilerinin gerçek zamanlı takibi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, hibrit sistemlerin hem kararlı çalışmasını hem de uzaktan izlenebilirliğini sağlayan bütünlük bir çözüm sunmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

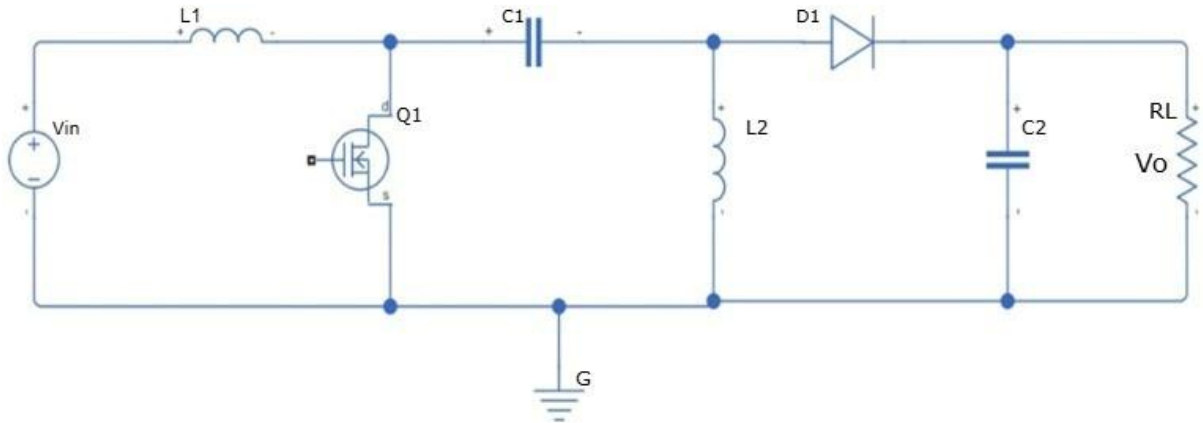
2.1 DA DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER:

DA-DA dönüştürücüler, devrenin girişine uygulanan doğru akımı, gerilim seviyesinde değişiklik yaparak çıkışa aktaran güç elektroniği devreleridir [16]. Doğrusal olmayan yarı iletken anahtarlama elemanları olan MOSFET ve IGBT gibi elemanların kontrol edilmesiyle bu potansiyel fark değişimi sağlanır. Günümüzde güç kaynakları, şarj adaptörleri, anahtarlamalı güç kaynakları (SMPS), güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi birçok farklı alanda ve amaçla kullanılmaktadır.

2.1.1 Single-Ended Primary Inductor Converter (SEPIC):

SEPIC dönüştürücü, DA gerilimini giriş değerine göre hem yükseltebilen hem de düşürebilen, oldukça kullanışlı bir dönüştürücü türüdür. Bu özelliği sayesinde geniş bir giriş gerilimi aralığında çalışan uygulamalar için ideal bir seçenek sunmaktadır. SEPIC’i diğer dönüştürücülerden ayıran en önemli özellik, gerilim ayarlaması yapılırken çıkış polaritesinin ters çevrilmemesidir; yani giriş ve çıkış aynı polariteye sahiptir [7].

Ayrıca bu topoloji, giriş ve çıkış akımlarındaki dalgalanmayı düşük seviyede tutabilmesi sayesinde yüksek verimlilik sağlayabilmektedir. Dönüştürücünün temel çalışma prensibi, iki endüktans ve bir ara kapasitör arasındaki kontrollü enerji transferine dayanmaktadır. Kontrollü anahtar iletimdeyken enerji her iki bobinde depolanır ve ara kapasitör şarj olur. Anahtar kesime geçtiğinde ise bobinlerde depolanan enerji, çıkış kapasitörüne ve buradanS yüke aktarılır. Bu sürekli enerji döngüsü, anahtarın görev döngüsü (duty cycle) ile kontrol edilerek kararlı bir çıkış gerilimi elde edilmesini sağlar. SEPIC devresi Görsel 2.1.1’de verilmiştir. Denklem 2.1.1.1’de SEPIC dönüştürücünün doluluk oranının hesaplanması, Denklem 2.1.1.2’de bobin değerinin hesaplanması ve Denklem 2.1.1.3’te kapasitör değerinin hesaplanması sunulmuştur.



Görsel 2.1.1, Sepic Dönüştürücü Devresi

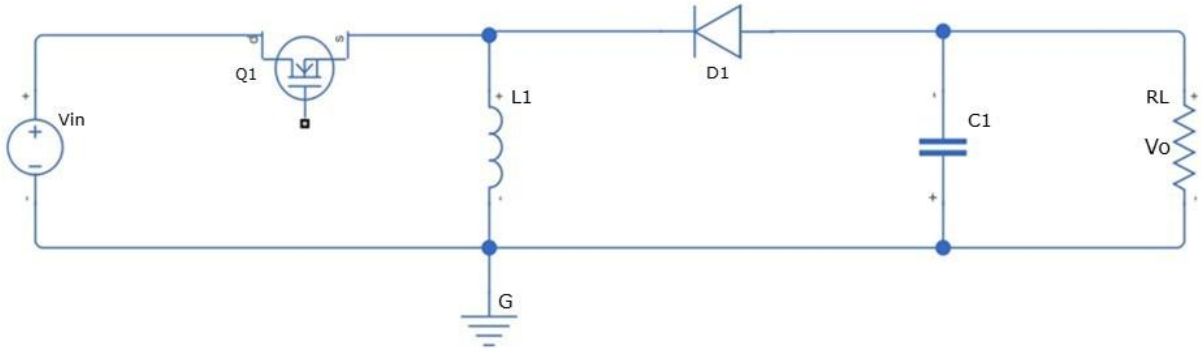
$$D = \frac{V_o}{V_o + V_i} \quad (2.1.1.1)$$

$$L = \frac{V_s(\min D).D_{max}}{DIL.f_{sw}} \quad (2.1.1.2)$$

$$C = \frac{I_o.D_{max}}{DV_{c1}.f_{sw}} \quad (2.1.1.3)$$

2.1.2 Düşüren Yükselten DA DA Dönüştürücü:

Görsel X'te düşüren-yükselten DA-DA dönüştürücü devresi verilmiştir. Bu devrede anahtarlama elemanı iletme alındığında kaynak bobini beslemekte ve bobin üzerinde enerji depolanmaktadır. Anahtarlama elemanı kesime geçtiğinde ise devrenin kaynakla bağlantısı kesilmekte, bobinde depolanan enerji diyot üzerinden filtre kondansatörüne ve yüke aktarılmaktadır. Bu işlem periyodik olarak tekrar ederek dönüştürücünün sürekli çalışmasını sağlamaktadır. Anahtarın iletimde kalma süresinin PWM sinyalinin periyoduna oranı doluluk oranı (D) olarak tanımlanmakta olup, ideal koşullar altında $D < 0,5$ olduğunda çıkış gerilimi giriş geriliminden düşük, $D > 0,5$ olduğunda ise çıkış gerilimi giriş geriliminden yüksek olmaktadır. Bu topolojiyi SEPIC devresinden ayıran temel özellik ise çıkış geriliminin polaritesini terslemesidir; yani çıkış gerilimi giriş gerilimine göre ters işaretlidir. Ayrıca, doluluk oranının hesaplanmasına ilişkin ifade Denklem 2.1.2.1'de, bobin değerinin hesaplanmasına ilişkin ifade Denklem 2.1.2.2'de ve kondansatör değerinin hesaplanmasına ilişkin ifade ise Denklem 2.1.2.3'te verilmiştir.



Görsel 2.1.2, Düşüren Yükselten Dönüştürücü Devresi

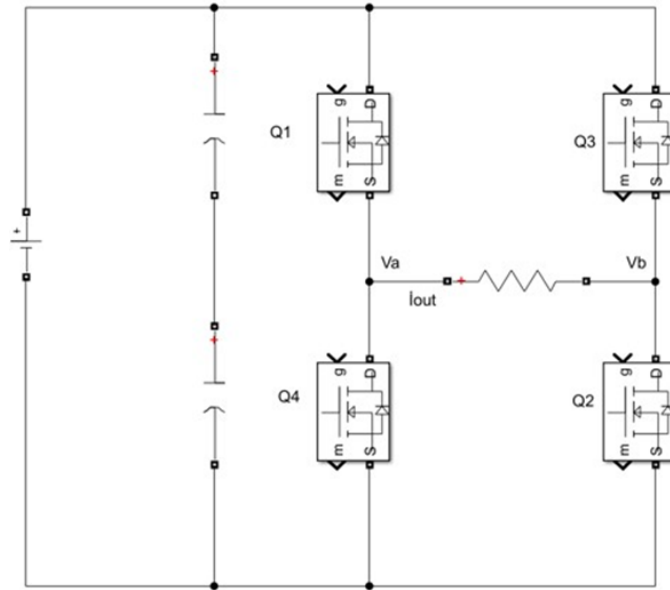
$$D = \frac{V_o}{V_o + V_s} \quad (2.1.2.1)$$

$$L = \frac{V_s.D}{DIL.f_{sw}} \quad (2.1.2.2)$$

$$C = \frac{I_o.D}{DV_o.f_{sw}} \quad (2.1.2.3)$$

2.2 DA AA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER (EVİRİCİLER):

Eviriciler; fotovoltaik piller, DA jeneratörler, kesintisiz güç kaynakları ve AA motor sürücülerini gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Eviriciler, gelen doğru akımı (DA) evirerek alternatif akıma (AA) dönüştüren devrelerdir. Eviricilerin genel yapısı, Şekil 2.2’de de görüldüğü üzere dört adet yarı iletken anahtarlama elemanından oluşmakta olup, görünüşünden dolayı bu yapıya H-köprü adı verilmektedir. Evirici devrelerinde bulunan dört yarı iletken anahtarlama elemanından ikisi pozitif alternansı, diğer ikisi ise negatif alternansı anahtarlayacak şekilde, aralarında 180° faz farkı olacak biçimde kontrol edilmektedir. Eviriciler ideal durumda tam bir sinüs dalga üretmelidir; ancak gerçekte anahtarlama elemanlarının doğası gereği harmonik bozunumlar oluşmakta ve gerilim ile akımın toplam harmonik bozunumu (THD) artmaktadır. Bu sebeple eviricilerin çıkışına filtreler bağlanmaktadır ve bu filtreler genellikle alçak geçiren filtrelerdir. Eviriciler, gerilim seviyesi, faz sayıları gibi parametrelere bağlı olarak çeşitlere ayrılmakta ve bir çok kontrol yöntemi bulunmaktadır.



Görsel 2.2, H Köprü Bir Fazlı Evirici Devresi

2.2.1 Eviricilerde Bipolar PWM Anahtarlama Yöntemi:

Bipolar PWM anahtarlama yönteminde yalnızca bir adet modülasyon sinyali kullanılmaktadır. Karşılaştırma işlemi, bu modülasyon sinyali ile taşıyıcı sinyal arasında gerçekleştirilmektedir. Tek bir modülasyon sinyali ile karşılaştırma yapılması nedeniyle, eviricide pozitif DA besleme ve negatif DA besleme durumları oluşmaktadır. Bu sebeple, evirici çıkışında negatif ve pozitif olmak üzere iki seviyeli bir gerilim elde edilmektedir. Bu anahtarlama yönteminde çıkış sinyali simetrik olmakla birlikte, toplam harmonik bozunum (THD) değeri yüksektir. Bu nedenle, harmonik etkilerin azaltılması amacıyla evirici çıkışına filtre bağlanması gerekmektedir.

Bipolar PWM anahtarlama metodunda bulunan kavramların tanımları aşağıda verilmiştir ve Bipolar PWM anahtarlama yöntemine ait çıkış gerilimi grafiği Görsel 2.2.1’de, anahtarlama metodunu gösteren tablo ise Çizelge 1’de gösterilmiştir.

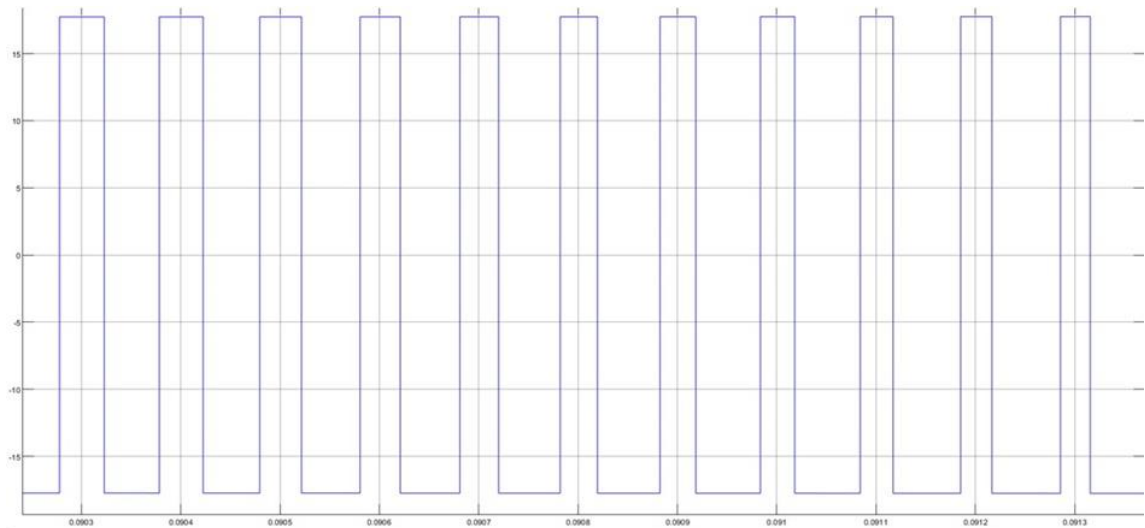
Taşıyıcı Sinyali: Anahtarlanan yarıiletkenlerin frekansını belirleyen ve genellikle üçgen dalga formunda seçilen sinyaldir. Taşıyıcı sinyalin frekansı f_c , genliği ise V_c ile gösterilmektedir.

Modülasyon Sinyali: Modülasyon sinyali, elde edilmek istenen dalga formunu temsil etmekte olup frekansı çıkış sinyalinin frekansına eşit olmalıdır. Modülasyon sinyalinin frekansı f_m , genliği ise V_m olarak ifade edilmektedir.

Modülasyon İndeksi: Modülasyon indeksi, modülasyon sinyalinin genliğinin taşıyıcı sinyalin genliğine oranını temsil etmektedir. 0 ile 1 arasında değer alabilmekte olup, anahtarlama kullanılan PWM sinyalinin doluluk oranını belirlemektedir.

Çizelge 1. Bipolar PWM Karşılaştırma ve Anahtarlama Durumları

Karşılaştırma Durumu	Anahtar Durumları	Alternans
$V_m > V_c$	Q_1, Q_2 İletimde Q_3, Q_4 Kesimde	Pozitif
$V_m < V_c$	Q_1, Q_2 Kesimde Q_3, Q_4 İletimde	Negatif



Görsel 2.2.1, Bipolar PWM Anahtarlama Yöntemi Filtresiz Evirici Çıkış Gerilimi

2.3 Maksimum Güç Noktası Takibi:

Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının doğaları gereği P–V eğrilerinde bir maksimum güç noktası (Maximum Power Point, MPP) oluşmaktadır. Uygun çalışma koşulları sağlanmadığında bu kaynaklar her zaman üretebilecekleri en yüksek gücü verememekte ve sistem verimi düşmektedir. Bu nedenle Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking, MPPT) algoritmaları zorunlu hâle gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli olarak maksimum güç üretebilmesi için kaynağın maksimum güç noktasındaki gerilim ve akım değerlerine karşılık gelen eşdeğer bir yük direncine bağlanması gerekmektedir ve bu direnç $R_{mpp} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}}$ şeklinde tanımlanmaktadır.

Ancak pratik uygulamalarda yük değeri sabit olmayıp zamanla değişebilmektedir. Bu nedenle kaynağın her zaman R_{mpp} değerinde bir yük görmesini sağlayan kontrol algoritmalarına ve güç elektroniği devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür algoritmalar Maksimum Güç Noktası İzleyicisi (MPPT) olarak adlandırılmakta olup, DA-DA dönüştürücünün doluluk oranını kontrol ederek kaynağın gördüğü eşdeğer yükü R_{mpp} değerine ayarlamakta ve sistemin maksimum güçte çalışmasını sağlamaktadır.

2.3.1 Artımlı İletkenlik Algoritması ve Tasarımı:

Artımlı İletkenlik (Incremental Conductance) MPPT algoritması, maksimum güç noktasında güç-gerilim eğrisinin eğiminin sıfır olduğu prensibine dayanır. Güç $P = V \cdot I$ olduğundan, maksimum güç noktasında $\frac{dP}{dV}$ koşulu sağlanır ve bu durum $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ eşitliği ile ifade edilir. Algoritma, anlık iletkenlik $\frac{I}{V}$ ile artımlı iletkenlik $\frac{dI}{dV}$ değerlerini karşılaştırarak çalışma noktasının maksimum güç noktasının sağında mı yoksa solunda mı olduğunu belirler; eğer $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ ise sistem maksimum güç noktasının solundadır ve gerilim artırılır, tersi durumda gerilim azaltılır. Eşitlik sağlandığında ise maksimum güç noktasına ulaşılmış olur ve doluluk oranı sabit tutulur. Bu yöntem, özellikle hızlı değişen ışınım ve sıcaklık koşullarında maksimum güç noktasını daha doğru ve kararlı biçimde izleyebilmesi nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir.

2.4 Güç Elektroniği Devrelerinde Kontrol Yöntemleri:

DA-DA dönüştürücüler endüstride çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Bu amaçlardan bazıları; regüle edilmemiş bir DA sinyalinin regüle edilmesi, regüleli bir DA sinyalinin istenilen seviyeye düşürülmesi veya yükseltilmesidir.

Bu projede iki farklı yenilenebilir enerji kaynağının birleştirilerek tek bir hattan güç sağlanması amaçlanmaktadır. Bu nedenle, bu bölüm altında regüleli bir DA sinyalinin istenilen seviyeye getirilmesi ve kararlı bir şekilde sabit bir gerilimde tutulması için gerekli olan regülasyon kontrol yöntemleri ele alınacaktır. İki farklı yenilenebilir enerji kaynağından maksimum güç çekilmesi amacıyla her kaynakta ayrı bir MPPT devresi kullanılacaktır. Bu MPPT devrelerinin çıkışlarında elde edilen gerilim seviyeleri, kaynakların karakteristik yapıları nedeniyle birbirinden farklı olacaktır.

Bu durum, DA-DA dönüştürücü regülatör devrelerinin projede kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Kullanılacak kontrol yönteminin kararlı çalışması büyük önem taşımaktadır. Aksi takdirde iki kaynak arasında bir potansiyel fark oluşacak ve bu potansiyel farkın giderilmesi amacıyla kaynaklar arasında bir sirkülasyon akımı meydana gelecektir. Oluşan bu sirkülasyon akımı, daha yüksek potansiyele sahip kaynaktan daha düşük potansiyele sahip kaynağa doğru akacaktır. Bu durum, sistem verimini düşürmenin yanı sıra devre elemanları üzerinde istenmeyen zorlanmalara da sebep olabilecektir. Oluşabilecek bu sirkülasyon akımının engellenmesi amacıyla DA-DA dönüştürücü regülatörlerinden faydalanılacaktır.

DA-DA dönüştürücülerin regülatör olarak kullanılmasında çeşitli kontrol yöntemleri bulunmaktadır.

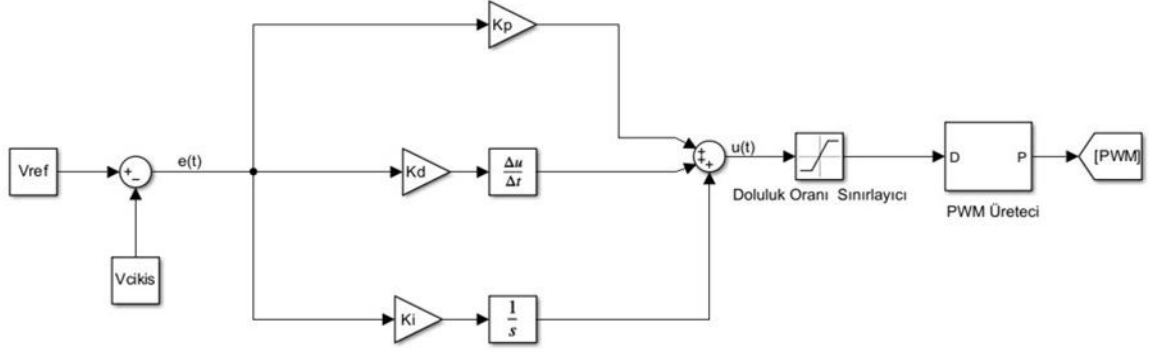
2.4.1 Açık Çevrim Kontrol:

Bu kontrol yönteminde, giriş geriliminin sabit ve bilinen bir değere sahip olduğu varsayımıyla hesaplanan doluluk oranına karşılık gelen bir PWM sinyali üretilmektedir. Üretilen bu PWM sinyali, yarı iletken anahtarlama elemanının sürülmesinde kullanılmaktadır. Bu kontrol yapısında çıkış gerilimine ilişkin herhangi bir geri besleme bulunmadığından, hata düzeltme mekanizması mevcut değildir. Bu nedenle giriş geriliminde veya yük koşullarında meydana gelen değişimlere bağlı olarak doluluk oranı güncellenememektedir. Sonuç olarak açık çevrim kontrol yöntemi, yalnızca giriş geriliminin sabit ve regüleli olduğu ve sabit yüklü durumlarda güvenilir sonuçlar verebilmektedir.

2.4.2 Kapalı Çevrim Kontrol:

Bu yöntemi, geri besleme esasına dayanan ve hata düzeltme yeteneği sayesinde değişken giriş gerilimi ve yük koşullarına karşı dayanıklılık sağlayan bir kontrol yapısıdır. Bu yöntemde sistem, başlangıçta önceden belirlenen doluluk oranındaki PWM sinyal ile yarı iletken anahtarlama elemanının sürülmesiyle çalışmaya başlatılmakta, ardından DA-DA dönüştürücünün çıkışından ölçülen gerilim değeri ile hedeflenen referans gerilimi arasındaki fark hesaplanarak hata sinyali oluşturulur. Hata sinyali $e(t) = V_{ref} - V_{çıkış}$ ifadesiyle tanımlanmakta ve bu sinyal P, PI veya PID gibi denetleyici yapılarında işlenerek yeni bir doluluk oranı hesaplanmaktadır. Hesaplanan doluluk oranına karşılık gelen PWM sinyali ile anahtarlama elemanı yeniden sürülmekte ve bu işlem sürekli olarak tekrarlanarak çıkış geriliminin referans gerilimine yakınsaması sağlanmaktadır. Kapalı çevrim kontrol yöntemi, açık çevrim kontrol yöntemine kıyasla daha kararlı ve stabil bir çalışma sunmakta olup, denetleyici parametrelerinin uygun şekilde tasarlanması durumunda yüksek hassasiyet elde edilebilmesine rağmen referans gerilimine ulaşma hızı akım modlu kontrol yöntemlerine kıyasla daha yavaş olabilmektedir. Kapalı çevrim kontrol yöntemine ait blok diyagram Görsel 2.4.2’te, denetleyicinin matematiksel ifadesi ise Denklem 2.4.2.1’de verilmiştir.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + K_i \cdot \int_0^t e(T) dT \quad (2.4.2.1)$$

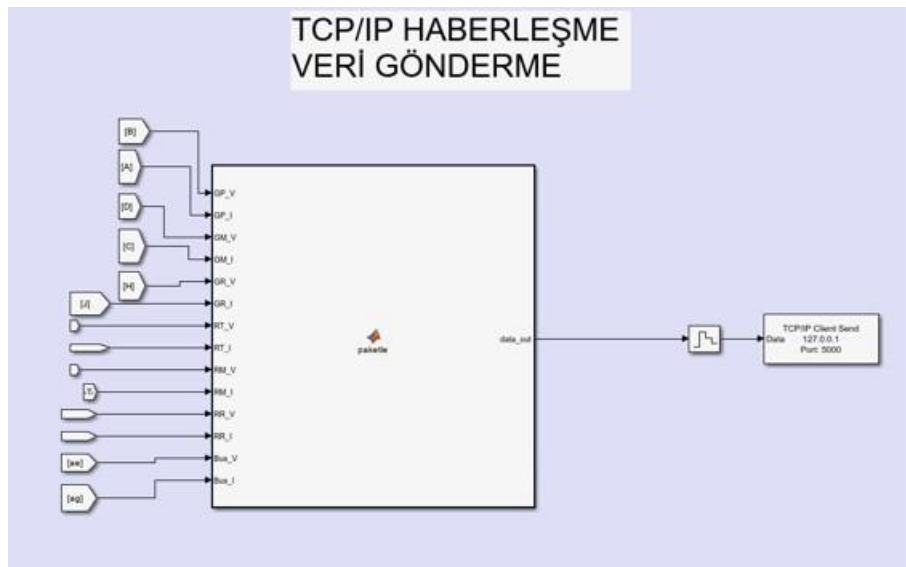


Görsel 2.4.2, PID Kontrolör Blok Diyagramı

2.5 MATLAB/Simulink TCP/IP Haberleşme

Simülasyon ortamı ile dış dünya arasındaki veri akışı, MATLAB/Simulink kütüphanesinde yer alan "TCP/IP Send" bloğu kullanılarak sağlanmıştır. Bu yapıda Simulink, "İstemci" (Client) rolünü üstlenmektedir. Veri iletiminin sağlıklı gerçekleşebilmesi için hedef IP adresi yerel ana bilgisayar (Localhost) olan "127.0.0.1" ve port numarası "5000" olarak yapılandırılmıştır.

Simülasyonun her adımında üretilen elektriksel parametreler (gerilim, akım, güç vb.), doğrudan gönderilmek yerine önce bir paketleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu amaçla özelleştirilmiş bir MATLAB Function bloğu kullanılarak, 14 adet double tipindeki veri (Güneş Paneli V/I, Rüzgar Türbini V/I, MPPT çıkışları, Regülatör çıkışları vb.) tek bir bayt dizisi haline getirilmiştir. Her bir double veri 8 bayt yer kapladığından, oluşturulan veri paketinin toplam boyutu 112 bayt (14 x 8 bayt) olarak sabitlenmiştir. Ayrıca, simülasyonun çok küçük zaman adımlarında çalışması nedeniyle haberleşme hattını tıkamamak adına "Zero-Order Hold" (Sıfır Dereceli Tutucu) bloğu kullanılmış ve veri gönderim frekansı optimize edilmiştir.



Görsel 2.5. TCP/IP Haberleşme MATLAB

2.6 Python TCP/IP Sunucu (Server) Tasarımı

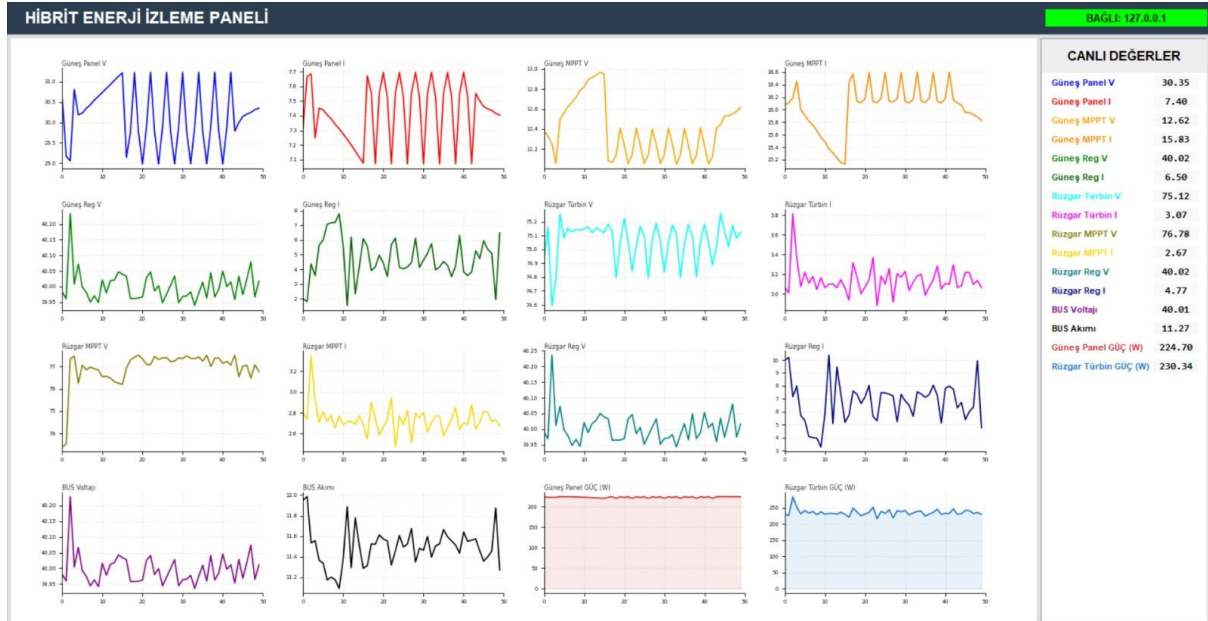
Arayüz tarafında veri alımı için Python programlama dili ve socket kütüphanesi kullanılarak bir TCP/IP sunucusu (Server) oluşturulmuştur. Sunucu, 0.0.0.0 adresine bağlanarak ağ üzerindeki tüm arayüzlerden gelen bağlantıları kabul edecek şekilde yapılandırılmış ve 5000 numaralı portu dinlemeye başlamıştır.

Haberleşme protokolü, bağlantı tabanlı (connection-oriented) bir yapıya sahip olduğundan, Python sunucusu başlatılmadan Simulink simülasyonu veri gönderememektedir. Bağlantı sağlandıktan sonra, sunucu sürekli bir döngü içerisinde 112 baytlık veri paketlerini beklemektedir. Alınan ham binary (ikili) veriler, Python'un struct kütüphanesi kullanılarak unpack işlemine tabi tutulmakta ve anlamlı ondalıklı sayılara (float/double) dönüştürülerek görselleştirme algoritmasına aktarılmaktadır.

2.7 Python ve Tkinter ile Grafikselleştirme Arayüz (GUI) Tasarımı

Kullanıcı etkileşimini sağlamak ve verileri düzenli bir şekilde sunmak amacıyla Python'un standart GUI kütüphanesi olan Tkinter kullanılmıştır. Matplotlib kütüphanesi grafik çizimi için güçlü olsa da, butonlar ve düzenli paneller oluşturmada yetersiz kaldığı için ana iskelet Tkinter üzerine inşa edilmiştir.

Arayüz tasarımı, kullanıcı ergonomisi gözetilerek iki ana bölüme ayrılmıştır. Sağ panelde, sistemden okunan anlık gerilim, akım ve güç değerleri sayısal olarak listelenirken; sol panelde bu değerlerin zaman içerisindeki değişimini gösteren grafikler yer almaktadır. Grafik pencereleri harici olarak açılmak yerine, FigureCanvasTkAgg sınıfı kullanılarak Tkinter penceresinin içerisine gömülmüş (embedded), böylece bütünleşik ve kompakt bir izleme paneli elde edilmiştir.



Görsel 2.7. Hibrit Enerji İzleme Paneli

2.8 Matplotlib Kütüphanesi ile Canlı Grafik Çizimi

Simülasyondan alınan verilerin görselleştirilmesi için Matplotlib kütüphanesi tercih edilmiştir. Gerçek zamanlı izleme yapıldığı için grafiklerin sürekli akması gerekmektedir.

Ancak, simülasyon süresince biriken tüm verilerin her adımda yeniden çizdirilmesi, işlemci yükünü artırarak arayüzün donmasına neden olabilmektedir. Bu problemi aşmak için "Kayan Pencere" (Sliding Window) yöntemi uygulanmıştır.

Bu yöntemde, grafik eksenini simülasyonun başlangıç anını değil, sadece son belirli bir veri setini (örneğin son 50 veri noktası) kapsayacak şekilde dinamik olarak güncellenir. Böylece bellek kullanımı optimize edilmiş ve grafiklerin akıcılığı sağlanmıştır. Her yeni veri paketi ulaştığında grafikler anlık olarak yenilenerek (update) sinyal değişimleri gecikmesiz olarak kullanıcıya sunulmaktadır.

2.9 Thread (İş Parçacığı) ile Performans Optimizasyonu

Arayüzün kararlı çalışması ve veri akışı sırasında kilitlenmelerin (freezing) önlenmesi amacıyla "Çoklu İş Parçacığı" (Multithreading) yapısı kullanılmıştır. Tek iş parçacıklı bir yapıda, veri bekleme ve alma işlemleri arayüzün ana döngüsünü (Main Loop) bloklayarak pencerenin tepki vermemesine neden olmaktadır.

Bu sorunu çözmek için Python'un `threading` kütüphanesi kullanılmıştır. TCP/IP sunucu döngüsü (Server Loop) ve veri işleme algoritmaları, arka planda çalışan ayrı bir iş parçacığı (Daemon Thread) olarak tanımlanmıştır. Ana iş parçacığı (Main Thread) ise sadece GUI'nin güncellenmesi ve kullanıcı etkileşimlerinden sorumlu tutulmuştur. Bu paralel çalışma yapısı sayesinde, yüksek hızlı veri akışı sırasında dahi arayüzün akıcı ve tepkisel kalması sağlanmıştır.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

3.1 Güneş Paneli ve Rüzgâr Türbini Simülasyon Sonuçları:

Simülasyon sonuçları incelendiğinde; güneş paneli kısmındaki regülatörün doluluk oranının artarak gerilimi 40V seviyesinde sabitlemeye çalıştığı, rüzgâr türbini tarafında ise doluluk oranının düşük tutularak DA bara geriliminin referans değerinde dengelendiği gözlemlenmiştir. Güneş paneli gerilimi bir miktar düşük kalsa da MPPT algoritması sistemi sürekli maksimum güç noktasında tutmaktadır. Benzer bir durum rüzgâr türbini kısmı için de geçerli olup, MPPT noktasının daha düşük bir seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Önemli bir bulgu olarak; üç fazlı jeneratör parametreleri optimize edilerek gerçekçi sonuçlara yaklaşılmış olsa da jeneratörün başlangıçta aşırı yüksek gerilim ve akım ürettiği görülmüştür. Bu durumu engellemek adına jeneratöre sabit hız uygulanmış ve sistemdeki diğer kaynaklara baskın gelmesini önlemek amacıyla gücü kasıtlı olarak sınırlandırılmıştır.

Grafikler incelendiğinde, gerilimin başlangıçta 3V'luk bir aşım yaptıktan sonra referans değerine oturduğu ve DA baranın sabit referans gerilimine kenetlendiği görülmüştür. DA/AA dönüştürücü olan evirici, DA bara gerilimini istenilen AA gerilime başarıyla dönüştürmüştür. Ayrıca, sistemdeki RL yük kaynaklı faz kayması da simülasyon çıktılarında gözlemlenmiştir. Son olarak Görsel 3.1.1 ve Görsel 3.1.2'de bulunan grafiklerde mavi grafikler güneş paneli ve rüzgâr türbini güçlerini, kahverengi grafikler güneş paneli ve rüzgâr türbini çıkış gerilimlerini ve kırmızı grafikler ise güneş paneli ve rüzgâr türbini akımlarını ifade etmektedir. Görsel 3.1.3 ve Görsel 3.1.4'te bulunan grafiklerde ise mavi olan eğri DA bara gerilimini ve evirici çıkış gerilimi grafiğini ifade etmektedir. Kırmızı olan grafikler ise DA bara akımını ve evirici çıkış

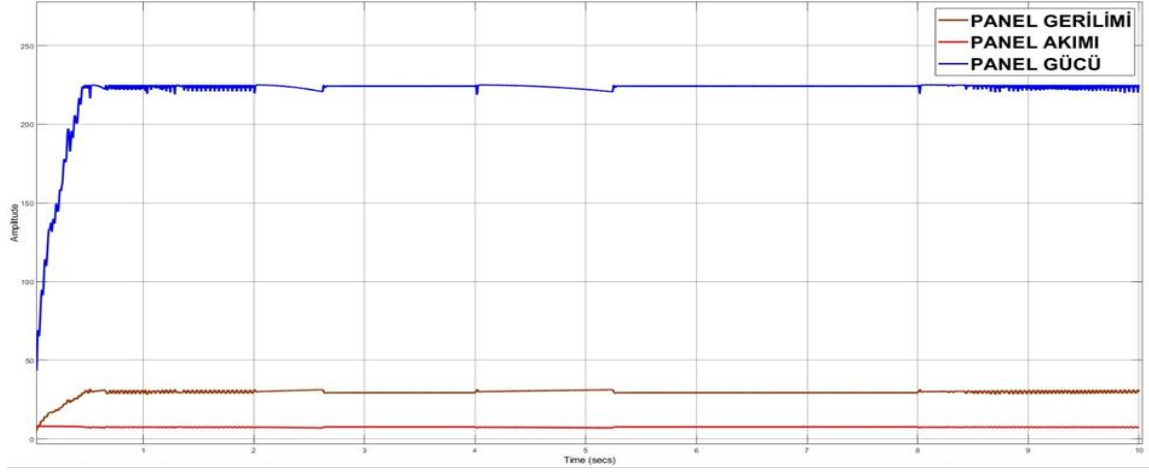
akımını ifade etmektedir. Çizelge 2'de ise devre parametreleri ve Çizelge 3'te kapalı çevrim Düşüren Yükselten DA-DA dönüştürücülerinin denetleyici parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2. Devre Parametreleri

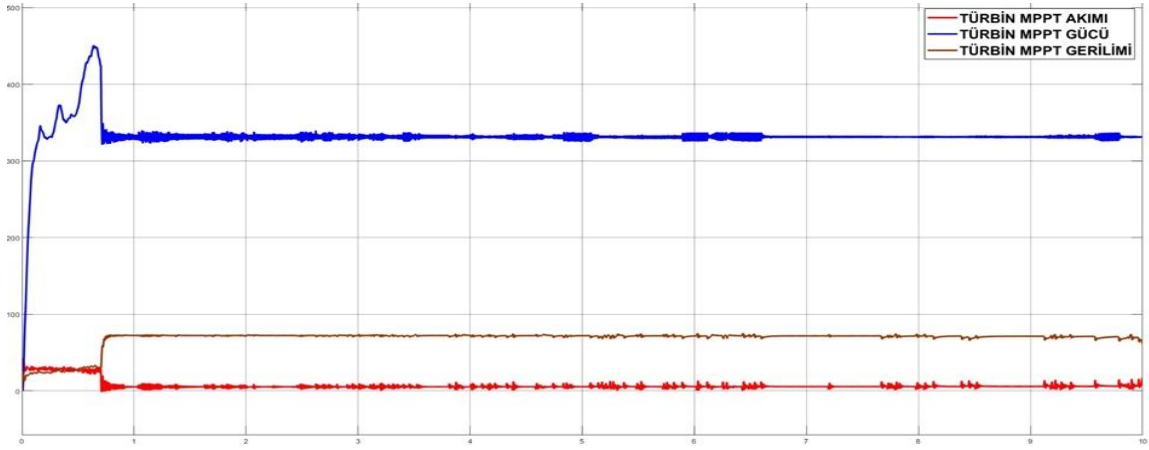
Parametreler	L1(uH)	L2(uH)	C1(uF)	C2(uF)	Fsw(kHz)
SEPIC DA DA Dönüştürücü (MPPT)	1500	1500	22	2200	25
Düşüren Yükselten DA DA Dönüştürücü (Regülatör)	65	Yok	6800	Yok	100
DA AA Evirici	3000 (Filtre)	Yok	480 (Filtre)	Yok	10

Çizelge 3. Düşüren Yükselten Regülatör Denetleyici Parametreleri

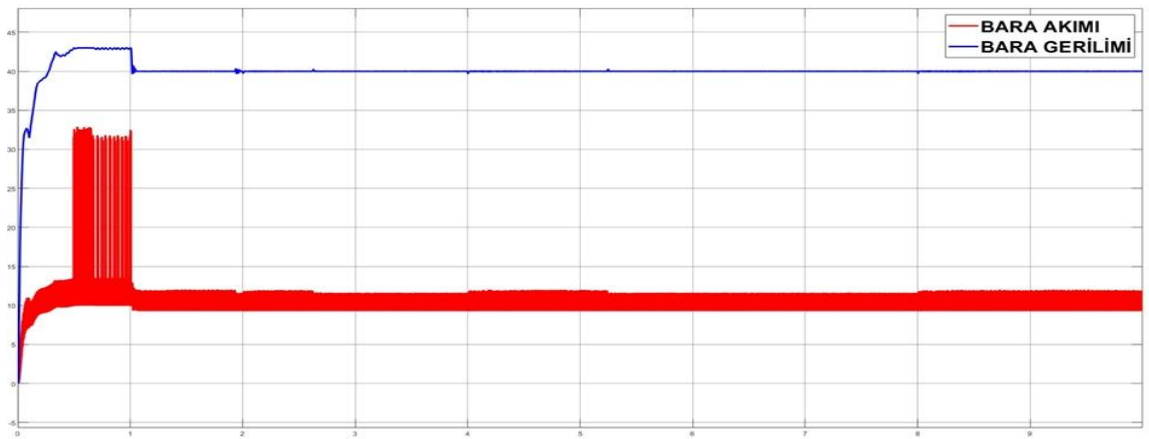
Parametreler	P	I	D
Düşüren Yükselten DA DA Dönüştürücü	0.08	30	0



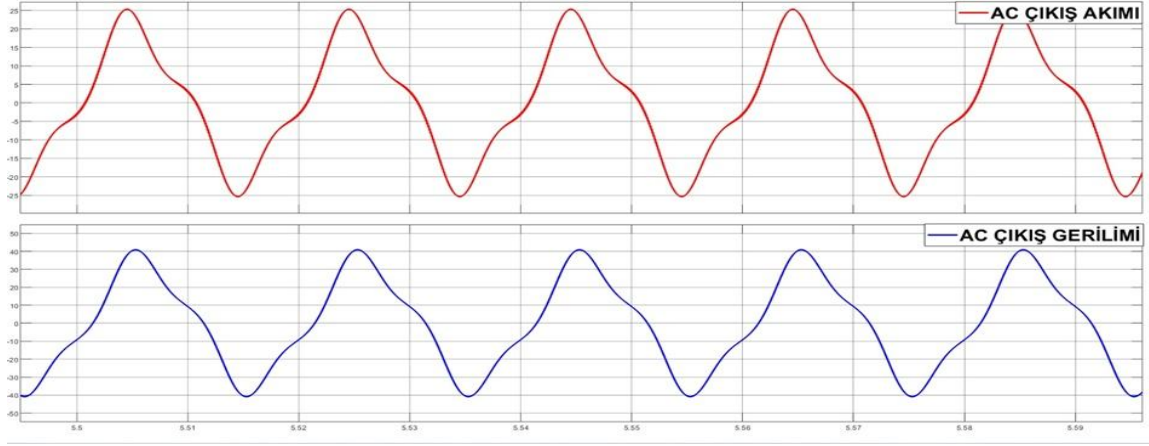
Görsel 3.1.1, Güneş Paneli MPPT Simülasyon Sonuçları



Görsel 3.1.2, Rüzgâr Türbini MPPT Simülasyon Sonuçları



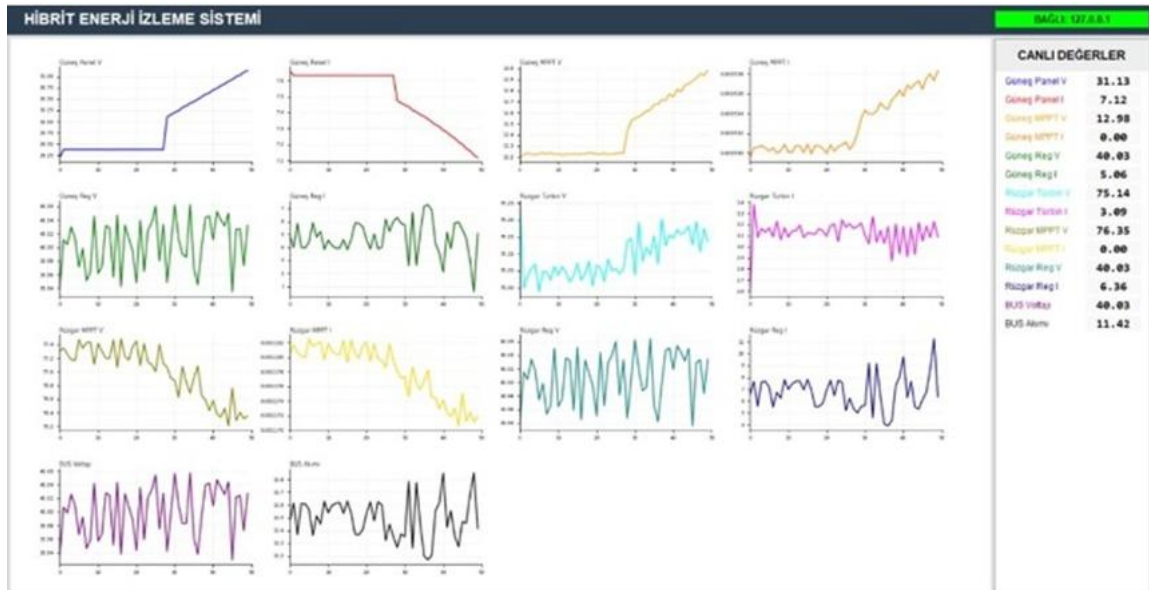
Görsel 3.1.3, DA Bara Simülasyon Sonuçları



Görsel 3.1.4, Evirici Simülasyon Sonuçları

3.2 Hibrit Enerji İzleme Paneli Sonuçları:

Gerçekleştirilen hibrit enerji izleme paneli, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan simülasyon modeli ile entegre çalışacak şekilde test edilmiş ve yapılan uygulamalar sonucunda sistemin simülasyon programı ile başarılı ve kesintisiz biçimde haberleştiği doğrulanmıştır. Simülasyon sürecinde üretilen akım, gerilim ve güç verilerinin belirlenen haberleşme yapısı üzerinden gerçek zamanlı olarak arayüze aktarıldığı, alınan verilerin hem zamana bağlı grafikler üzerinde görselleştirildiği hem de panelin ilgili bölümünde anlık sayısal değerler şeklinde kullanıcıya sunulduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede kullanıcı, rüzgâr ve güneş enerji kaynaklarından elde edilen elektriksel büyüklükleri eş zamanlı olarak izleyebilmekte, sistem performansını bütüncül biçimde değerlendirebilmekte ve enerji üretim değerlerini tek bir arayüz üzerinden kolaylıkla takip edebilmektedir. Tasarlanan arayüzün sade, anlaşılır ve kullanıcı dostu yapısı sayesinde veri okuma ve yorumlama süreci kolaylaştırılmış, hibrit enerji sisteminin izlenmesi daha etkin ve pratik hale getirilmiştir.



Görsel 3.2, Hibrit Enerji İzleme Paneli Simülasyon Görüntüsü

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada güneş paneli ve rüzgâr türbininden oluşan hibrit bir enerji üretim sistemi modellenmiş ve sistemin kontrol performansı MATLAB/Simulink ortamında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, farklı üretim karakteristiklerine sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının uygun kontrol stratejileri ve güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığıyla ortak bir DA bara yapısı altında başarılı şekilde entegre edilebildiğini göstermiştir. Maksimum güç noktası izleme algoritmalarının her iki kaynak için etkin biçimde çalıştığı ve değişken üretim koşullarında dahi enerji aktarımının sürekliliğini sağladığı belirlenmiştir. Böylece kaynaklardan elde edilen gücün sisteme kontrollü ve koordineli bir şekilde aktarılabilirdiği doğrulanmıştır.

Simülasyon sonuçları, DA bara geriliminin referans değer çevresinde korunabildiğini ve sistemin gerilim regülasyon performansının yeterli düzeyde olduğunu ortaya koymuştur. DA/AA dönüştürücü yapısının, doğru akım seviyesini istenilen alternatif akım gerilimine dönüştürerek yük gereksinimlerini karşılayabildiği ve sistemin elektriksel sürekliliğini sağladığı görülmüştür.

Çalışma kapsamında geliştirilen hibrit enerji izleme arayüzü, sistem değişkenlerinin eş zamanlı olarak izlenmesine olanak sağlamış; akım, gerilim ve güç değerlerinin hem grafiksel hem de sayısal olarak sunulması sayesinde sistem performansının bütüncül biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamıştır. Bu yönüyle model, yalnızca kontrol performansının analiz edilmesine değil, aynı zamanda sistem izleme ve değerlendirme süreçlerinin de etkin şekilde yürütülmesine imkân tanımaktadır.

Sonuç olarak çalışma, yenilenebilir enerji tabanlı hibrit güç sistemlerinin modellenmesi, kontrolü ve izlenmesi açısından bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bir bölümü, TÜBİTAK tarafından desteklenen 124E782 numaralı 1002 Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, sağlanan destek için TÜBİTAK'a teşekkür eder.

KAYNAKÇA

- [1] Patel, N., Agarwal, P., Comprehensive Modeling and Simulation of Hybrid PV/Wind Energy System using MATLAB/Simulink, International Journal of Energy Research, 46(3), 2345-2360, 2022.
- [2] Hossain, M. S., Madloul, N. A., Rahim, N. A., Role of MATLAB/Simulink in Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135, 110123, 2021.
- [3] Zhang, Y., Liu, J., Development of Open-Source Energy Monitoring Platforms using Python: A Comparative Study with Commercial SCADA, IEEE Access, 11, 45012-45025, 2023.
- [4] Al-Falahi, M. D., Jayasinghe, S. D., Enshaei, H., A Review on Recent Size Optimization Methodologies for Hybrid Power Systems using Python-Based Algorithms, Energy Conversion and Management, 205, 112445, 2020.

- [5] Kumar, R., Singh, S., Inter-Platform Data Exchange between MATLAB and Python using TCP/IP Protocols for Power System Applications, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(5), 1123-1133, 2019.
- [6] Gupta, A., Saini, R., Real-Time Co-Simulation Framework for Smart Grid Monitoring using MATLAB and Python, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 109, 102288, 2021.
- [7] Eroğlu, H., Çetin, E., Software-in-the-Loop Verification of MPPT Algorithms using MATLAB-Python Interface, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 30(3), 890-905, 2022.
- [8] Silva, V., Lopes, F., Visualization of Power Quality Disturbances: A Matplotlib and Tkinter Approach, *IEEE Latin America Transactions*, 18(02), 234-241, 2020.
- [9] Chen, X., Wang, L., Socket Programming for Real-Time Data Transfer in Distributed Simulation Systems, *Advances in Engineering Software*, 115, 45-53, 2018.
- [10] Popovic, T., Kacar, S., Using Python for Rapid Prototyping of Smart Grid Monitoring Applications, *Proceedings of the IEEE Eurocon*, 1-6, 2019.
- [11] El-Sayed, A. M., Metwally, H., Performance Analysis of SEPIC and Buck-Boost Converters in Hybrid Systems using MATLAB Environment, *Solar Energy*, 214, 12-25, 2021.
- [12] Wu, J., Feng, Y., A Lightweight Graphical User Interface for Power System Simulation based on Python, *Journal of Physics: Conference Series*, 2215, 012034, 2022.
- [13] Rodriguez, C., Amaratunga, G., Linking High-Level Numerical Computing (MATLAB) with General Purpose Programming (Python) for Renewable Energy Analysis, *Applied Energy*, 250, 150-160, 2019.
- [14] Tariq, M., Poor, H. V., Data Visualization Techniques for Large-Scale Power Systems using Open Source Tools, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3456-3467, 2020.
- [15] Yuan, X., Tang, Y., Design of TCP/IP Communication Interface for Distributed Co-Simulation of Power Electronics, *Energies*, 14(9), 2567, 2021.
- [16] Çimen, M. E., Kuyumcu, A., Sunca, K. Y., Yalçın, Y., Akgül, A., & Boz, A. F. (2025). Mppt And Controller Design Using Metaheuristic Algorithms For A Buck-Boost Converter Connected To A Pv Panel. *Journal of Smart Systems Research*, 6(2), 110-126.

SÜPERKAPASİTÖR UYGULAMALARI İÇİN KARBOKSİMETİL SELÜLOZ (CMC) TABANLI ESNEK ELEKTROTLARDA KURUTMA KOŞULLARININ ELEKTROKİMYASAL PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Öğr. Gör. Dr. Selva SERTKAYA

Düzce Üniversitesi, selvasertkaya@duzce.edu.tr - 0000-0002-0490-1821

Doç. Dr. Ahmet DEMİR

Düzce Üniversitesi, ahmetdemir@duzce.edu.tr - 0000-0002-8702-1941

ÖZET

Süperkapasitörler, iki elektrot, bir ayırıcı ve bir elektrolit çözeltisinden oluşan, olağanüstü elektrokimyasal performansları ve mekanik esneklikleri sayesinde taşınabilir elektronik cihazlarda ve hibrit araç teknolojilerinde kullanılan, geleneksel piller ve diğer enerji depolama sistemlerine göre üstün özelliklere sahip elektrokimyasal yük depolama sistemleridir. Bu çalışmada, PEDOT:PSS ile karboksimetilselülöz (CMC) karışımından hazırlanan esnek filmlerin mikro yapısal özellikleri ve elektrokimyasal performansları, iki farklı kurutma protokolünün etkileri altında incelenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Döngüsel Voltametri (CV), Galvanostatik Şarj-Deşarj (GCD) ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak, kontrollü bir termal işlemle kurutulan CMC-ETV numunesi ile oda sıcaklığında pasif olarak kurutulan CMC-ODS numunesinin morfolojileri ve elektrokimyasal davranışları karşılaştırılmıştır. SEM analizleri, CMC-ETV numunesinde homojen, yoğun ve yönlendirilmiş fibril yapısının varlığını ortaya koyarken, CMC-ODS numunesinde düzensiz, parçalanmış ve gözenekli morfoloji gözlenmiştir. Elektrokimyasal karakterizasyon sonuçları, bu mikro yapısal farklılıkların doğrudan elektrokimyasal performansa yansıdığını göstermektedir. CMC-ETV numunesi, CMC-ODS'ye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek spesifik kapasitans, daha düşük seri direnç (R_s) ve daha düşük şarj transfer direnci (R_{ct}) sergilemiştir. Bu bulgular, kontrollü kurutma protokolünün, solventin kademeli olarak uzaklaştırılmasını sağlayarak PEDOT:PSS zincirlerinin yeniden düzenlenmesini ve organize, sürekli bir ağ yapısı oluşturmasını teşvik ettiğini açıkça göstermektedir. Sonuç olarak, kurutma koşullarının hassas kontrolü, iletken polimer bazlı esnek cihazların üretiminde istenen performansa ulaşmak için kritik bir faktördür.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal Karakterizasyon, İletken Polimerler, Karboksimetil selüloz (CMC), PEDOT:PSS, Süperkapasitör

1. GİRİŞ

Son yıllarda, dünya genelinde enerji talebi, endüstriyel büyüme ve çeşitli ekonomik sektörlerin genişlemesiyle birlikte önemli ölçüde artmıştır. Sürekli artan nüfus, küresel enerji ihtiyaçlarını daha da yoğunlaştırmıştır (Akhlaq vd., 2023; Delbari vd., 2021). Enerji altyapısı üzerindeki bu artan baskı, geleneksel petrol bazlı enerji üretiminin sınırlamalarını ortaya çıkarmış ve alternatif enerji depolama çözümlerinin gerekliliğini vurgulamıştır. Bu bağlamda, süperkapasitörler (veya ultrakapasitörler) umut vadeden elektrokimyasal enerji depolama sistemleri olarak

önemli ölçüde dikkat çekmiştir (Fan vd., 2019; Wang vd., 2021). Bu cihazlar, geniş yüzey alanları ve ultra ince dielektrik ayırıcıları sayesinde geleneksel kapasitörlere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek kapasitans sergilerler (Poonam vd., 2019; Tseghai vd., 2020). Ek olarak, süperkapasitörler yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj-deşarj kabiliyeti ve geniş bir sıcaklık aralığında güvenilir performans gibi avantajlar sunarak belirli uygulamalarda bataryalara ve yakıt hücrelerine göre üstünlük sağlar. Ancak, bataryalara kıyasla nispeten düşük enerji yoğunlukları önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Bu sınırlama, yeni elektrot malzemeleri ve ileri üretim teknikleri üzerine kapsamlı araştırmaları motive etmektedir (Raghavendra vd., 2020; Wang vd., 2002). Çok sayıda çalışma, elektrot mimarisini optimize etmeye ve yeni malzeme kompozisyonlarını keşfetmeye odaklanırken, aynı zamanda süperkapasitör teknolojisinin çeşitli endüstriyel sektörlerdeki güçlü ve zayıf yönlerini de değerlendirmektedir (Pandya vd., 2023; Yang vd., 2020).

Süperkapasitörlerin performansı, elektrot malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilenir. Bu malzemeler için temel gereksinimler arasında yüksek elektriksel iletkenlik, termal ve kimyasal kararlılık, yüksek özgül yüzey alanı, korozyon direnci, çevre dostu olma ve düşük maliyet bulunur (Keene vd., 2022). Ayrıca, faradaik yük transfer mekanizmaları sistemin genel kapasitansını (C_s) artırabilir. Güç yoğunluğundaki (P_s) değişimler, eşdeğer seri dirençteki (ESR) değişikliklerle yakından ilişkilidir; özellikle azalan gözenek boyutu kapasitansı ve enerji yoğunluğunu (E_s) iyileştirme eğilimindedir. Daha büyük gözeneklere sahip elektrotlar, yüksek tepe akımı gerektiren uygulamalarda avantajlıdır. Tersine, daha küçük gözenekli elektrotlar, yüksek enerji yoğunluğunun öncelikli olduğu durumlarda daha uygundur (Marzocchi vd., 2015).

Süperkapasitörler genel olarak üç ana gruba ayrılır: elektrokimyasal çift tabakalı kapasitörler (EDLC'ler), psödokapasitörler ve her iki mekanizmayı birleştiren hibrit sistemler. EDLC'ler, elektrot-elektrolit arayüzünde iyonların fiziksel adsorpsiyonu ve desorpsiyonu yoluyla çalışarak nanometre ölçeğinde bir yük ayrımı tabakası oluşturur. Bu elektrostatik depolama süreci, oksidasyon-indirgeme (redoks) reaksiyonları içermediği için faradaik değildir. Buna karşılık psödokapasitörler, metal oksitler, iletken polimerler veya heteroatom katkılı karbonlar gibi aktif malzemeler sayesinde hızlı ve tersinir yüzey redoks reaksiyonlarına dayanan faradaik süreçlerle çalışır. Bu yük depolama mekanizması, EDLC'lere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek hacimsel enerji yoğunluklarına olanak tanır. Psödokapasitörler, bu elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle genellikle üstün enerji yoğunluğu ve spesifik kapasitans sunarken, fiziksel yük depolama yapıları nedeniyle tipik olarak olağanüstü uzun çalışma ömürleri sergileyen EDLC'lere kıyasla daha düşük çevrim kararlılığına sahip olabilirler. İdeal süperkapasitör elektrot malzemeleri; yüksek spesifik kapasitans, mükemmel elektriksel iletkenlik ve düşük eşdeğer seri direnç (ESR) ile karakterize edilir.

İletken polimerler, bu bağlamda, doğal olarak bu temel niteliklere sahip oldukları için umut vadeden adaylar olarak ortaya çıkmaktadır. İletken polimerlerin en önemli avantajı, geniş yüzey alanları, redoks aktivitesi yoluyla önemli yük depolama kapasiteleri ve ayarlanabilir elektronik özelliklerinde yatmaktadır. Bu polimerlerin elektriksel iletkenliği, kimyasal veya elektrokimyasal katkılama yoluyla hassas bir şekilde artırılabilir ve bu da onları süperkapasitör elektrotları için özellikle uygun kılar. Aktif karbonlar gibi geleneksel karbon bazlı

malzemelerle karşılaştırıldığında, iletken polimerler birkaç belirgin avantaj sunar. Önemli örnekler arasında poli(anilin), poli(pirrol), poli(3-hekziltiyofen) ve poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT) bulunur. Bu malzeme sınıfı, yüksek performanslı metal oksitlere bile rakip olabilecek rekabetçi bir spesifik kapasitans sergilemektedir (Yang vd., 2020).

Karboksimetilselüloz (CMC), nispeten kolay üretilebilirliği, maliyet etkinliği ve yüksek mekanik dayanım, yüksek reaktivite ve biyobozunurluk gibi avantajlı özellikleri sayesinde polisakkaritler arasında öne çıkmaktadır (Ghanbarzadeh vd., 2010; Ruschhaupt vd., 2020). Bu özellikler, onu PEDOT'un in-situ polimerizasyonu için son derece uygun bir biyopolimer şablonu haline getirmektedir. CMC ve PEDOT arasındaki moleküler sinerji, sert PEDOT zincirlerinin esnek CMC omurgası üzerinde kaplanmasını kolaylaştırır. Bu etkileşim, tekrarlanan şarj-deşarj döngüleri sırasında PEDOT'un hacim genişlemesini ve büzülmesini etkili bir şekilde azaltarak, elde edilen esnek elektrodun çevrim kararlılığını ve hız kabiliyetini önemli ölçüde iyileştirir (Akhlaq vd., 2023; Li vd., 2022). Ayrıca CMC, polimerizasyon sırasında doğal bir dağıtıcı madde görevi görerek PEDOT zincirlerinin topaklanmasını engeller ve homojen bir morfolojiye sahip bir kompozit oluşumunu teşvik eder (Ghanbarzadeh vd., 2010; Tang vd., 2023). Bu tür bir yapısal homojenlik, düzensiz ve topaklanmış elektrot mimarilerine karşı belirgin elektrokimyasal avantajlar sağladığı için çok önemlidir. Sonuç olarak CMC hem PEDOT'un düzenli büyümesini hem de elektrokimyasal performansının iyileştirilmesini benzersiz bir şekilde mümkün kılmaktadır.

İletken polimerler, esnek elektronik, enerji depolama, biyo-sensörler ve termoelektrik uygulamalar gibi alanlardaki potansiyel uygulamaları nedeniyle son yıllarda yoğun ilgi görmektedir (Fan vd., 2019). Bu polimerler arasında, poli(3,4-etilendioksitiyofen):polistiren sülfonat (PEDOT:PSS), yüksek elektriksel iletkenliği, optik şeffaflığı ve sulu çözeltilerde işlenebilirliği ile öne çıkmaktadır (Fan vd., 2019). Özellikle, PEDOT:PSS filmleri, uygun modifikasyonlar yapıldığında 4000 S/cm'ye kadar elektriksel iletkenlik gösterebilir ve bu da onları saydam elektrotlar, esnek elektronik uygulamaları ve süperkapasitör elektrotları için ideal kılmaktadır (Fan vd., 2019). Bununla birlikte, PEDOT:PSS'in kırılgen yapısı ve mekanik özellikleri, esnek uygulamalardaki kullanımını sınırlamaktadır (Yang vd., 2020). Bu sorunu aşmak için karboksimetilselülöz (CMC) gibi biyopolimerlerle kompozitler oluşturmak etkili bir stratejidir (Akhlaq vd., 2023). CMC, mükemmel film oluşturma yeteneği, mekanik esnekliği, biyoyumluluğu ve çevre dostu yapısı ile PEDOT:PSS için ideal bir matris malzemesi görevi görür (Akhlaq vd., 2023; Ghanbarzadeh vd., 2010). CMC'nin higroskopik doğası ve polimerik yapısı, PEDOT:PSS zincirlerini destekleyerek mekanik dayanıklılığı artırırken, aynı zamanda elektrokimyasal aktiviteyi de olumlu yönde etkilemektedir (Ghanbarzadeh vd., 2010).

Kompozit filmin nihai elektrokimyasal performansı sadece bileşenlerin kimyasal doğasına değil aynı zamanda malzemenin mikro ve nano ölçekteki morfolojisine de büyük ölçüde bağlıdır (Keene vd., 2022). Özellikle PEDOT:PSS zincirlerinin düzenlenmesi, fibril ağının sürekliliği ve morfolojik homojenlik yük taşıma verimliliğini doğrudan etkiler (Keene vd., 2022). Bu morfolojik özellikler ise büyük ölçüde film hazırlama sürecindeki kurutma koşulları tarafından kontrol edilir. Polimer filmlerin kurutma kinetiği, solvent buharlaşması hızı ve kapiler kuvvetler son ürünün yapısını belirleyen kritik faktörlerdir. Literatürde polimer filmlerin kurutma kinetiği üzerine çalışmalar bulunmakla birlikte (Guerrier vd., 1998; Routh &

Russel, 1998), bu parametrelerin PEDOT:PSS/CMC kompozit filmlerinin elektrokimyasal performansına etkisi henüz sistematik olarak incelenmemiştir. Bu çalışmanın amacı, iki farklı kurutma protokolü olan; kontrollü termal kurutma (CMC-ETV) ve pasif oda sıcaklığında kurutmanın (CMC-ODS) PEDOT:PSS/CMC kompozit filmlerinin mikro yapısı ve elektrokimyasal performansı üzerindeki etkisini sistematik olarak incelemek ve bu yapısal değişikliklerin performans etkilerini bilimsel bir bakış açısıyla yorumlamaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Materyal

Ticari karboksimetil selüloz (CMC, Zag Kimya, 250–500 µm) Oksilab’tan temin edilmiştir. Süperkapasitör üretiminde hammadde olarak kullanılacak bileşenler; PEDOT:PSS PH1000 Heraus Clevios’tan, dimetil sülfoksit (DMSO, %99,8) Sigma Aldrich’ten temin edilmiştir. Ksantan gam (E415) Kimbiotek Kimyevi Maddeler San. Tic. A.Ş’den ve 1,3-propanediol MSA Kozmetik San. ve Tic. Ltd. Şti’den temin edilmiştir.

2.2 Karışım Hazırlama ve Kurutma Protokolü

1 gram ticari karboksimetil selüloz (CMC), 4 gram 1,3-propanediolde çözündürüldükten sonra (30°C, 2 saat) 95 gram deiyonize su ile homojen bir çözelti elde edilene dek karıştırılmıştır. Bağlayıcı olarak 0,6 gram ksantan gam (E415) ilave edildikten sonra karıştırılmaya devam edilerek, çözeltiye 2 gram % 5 dimetil sülfoksit (DMSO) içeren PEDOT:PSS ilave edilmiştir. 50°C’de 1 saat homojen bir çözelti elde edilene dek manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Ardından çözeltinin 30°C’ye soğuması beklenmiştir. Homojen dağılım sağlanması için karışıma 30 dakika ultrasonikasyon işlemi uygulanmıştır. Elde edilen karışım, homojen bir film tabakası oluşturacak şekilde 2 farklı cam petri kabına dökülerek kurumaya bırakılmıştır.

Kurutma protokolünde her iki numune de başlangıçta etüvde, 50°C’de 2 saat boyunca, cihaz kapağı yarı kapalı konumdayken kurutulmuştur. Bu ilk adımdan sonra numunelere farklı kurutma protokolleri uygulanmıştır. CMC-ETV numunesi ilk kurutma adımının ardından etüvde 50°C’de 1 saat daha tutulmuş ve sonrasında 60 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu protokol, çözücülerin kontrollü ve yavaş bir şekilde uzaklaşmasını sağlayarak polimer zincirlerinin optimal reorganizasyonunu teşvik etmektedir. CMC-ODS numunesi ise ilk kurutma adımının ardından, etüvden alınarak 60 saat boyunca doğrudan oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Bu protokol, kontrolsüz ve hızlı bir solvent buharlaşması ile karakterize edilmektedir. Kuruyan örnek ele yapışmayan esnek bir hal aldıktan sonra cam petri kabından soyularak elektrokimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.3 Karakterizasyon Teknikleri

Numunelerin yüzey morfolojileri, Quanta FEG Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile 20 kV hızlandırma gerilimi, ETD dedektörü ve SE modunda incelenmiştir. Görüntüler 250× ve 1000× büyütmelemlerde, HFW (Horizontal Field Width) değerleri sırasıyla 1657,6 µm ve 414,4 µm olarak alınmıştır (Alqaheem vd., 2020).

Elektrokimyasal karakterizasyon, IVIUMSTAT A06061 Potansiyostat-Galvanostat sistemi kullanılarak üç elektrotlu elektrokimyasal hücre modelinde gerçekleştirilmiştir. Elektrolit

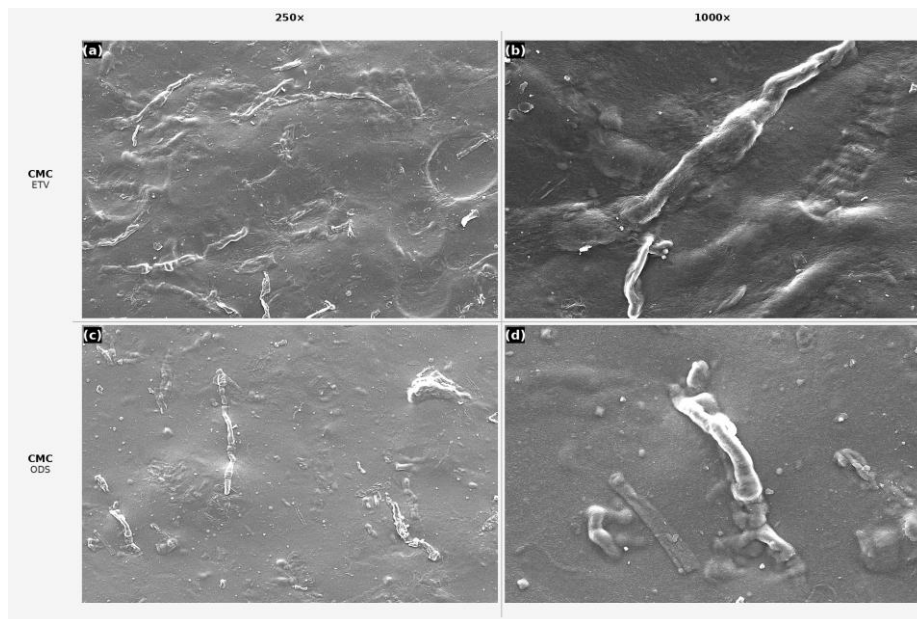
çözeltisi olarak 1 M Na₂SO₄ çözeltisi kullanılmıştır. Referans elektrot olarak doygun kalomel elektrot (SCE), karşıt elektrot olarak platin tel, çalışma elektrodu olarak ise hazırlanan CMC-PEDOT:PSS kompozit filmler kullanılmıştır. Ölçümler, elektrotların şartlandırılması için 100 mV/s tarama hızında 100 voltametrik çevrim gerçekleştirilerek stabil voltamogramlar elde edildikten sonra başlatılmıştır. Döngüsel voltametri (CV) ölçümleri 5, 10, 20, 50 ve 100 mV/s tarama hızlarında, galvanostatik şarj-deşarj (GCD) ölçümleri CMC-ETV numunesi için 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 ve 1,5 mA/cm², CMC-ODS numunesi için 0,75; 1,0; 1,25 ve 1,5 mA/cm² akım yoğunluklarında ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri 0,01–100.000 Hz frekans aralığında kaydedilmiştir. Tüm elektrokimyasal ölçüm sonuçları alan başına kapasitans (mF/cm²) cinsinden ifade edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

3.1 Morfolojik Karakterizasyon

CMC-ETV numunesinin SEM görüntüsü (Görsel 1a ve b), oldukça organize ve homojen bir yüzey morfolojisi sergilemektedir. Görüntüde en dikkat çekici özellik; uzun, sürekli ve birbirine paralel şekilde yönelmiş PEDOT:PSS fibrillerinin oluşturduğu ağ yapısıdır. Bu fibriller, CMC matrisi içerisinde iyi bir şekilde gömülmüş ve entegre olmuştur. Yüzey genel olarak pürüzsüz, yoğun ve sürekli; belirgin gözenekler veya çatlaklar gözlenmemektedir.

Fibrillerin bu düzenli yapısı, kontrollü kurutma protokolünün, polimer zincirlerinin kendilerini termodinamik olarak daha kararlı bir konformasyonda yeniden düzenlemeleri için yeterli zaman ve termal enerji sağladığının güçlü bir kanıtıdır. 50°C’de gerçekleştirilen kademeli ve yavaş solvent buharlaşması, ani kapiler kuvvetlerin oluşumunu engellemiştir (Guerrier vd., 1998). Polimer zincirlerinin CMC matrisi içinde hareket ederek uzun menzilli, sıralı yapılar oluşturmaya olanak tanımıştır. Literatürde bildirildiği üzere, PEDOT:PSS zincirlerinin optimal π - π etkileşimleri oluşturmaya, elektriksel iletkenliği önemli ölçüde artırmaktadır (Fan vd., 2019). Bu tür organize bir yapı, yük taşıyıcıları için verimli ve kesintisiz yollar sunarak elektriksel iletkenliği maksimize etme potansiyeline sahiptir (Keene vd., 2022).



Görsel 1. PEDOT:PSS/CMC kompozit filmlerin SEM görüntüleri. (a) CMC-ETV, 250×; (b) CMC-ETV, 1000×; (c) CMC-ODS, 250×; (d) CMC-ODS, 1000×. (Tüm görüntüler 20 kV, ETD dedektörü, SE modu Quanta FEG cihazında alınmıştır)

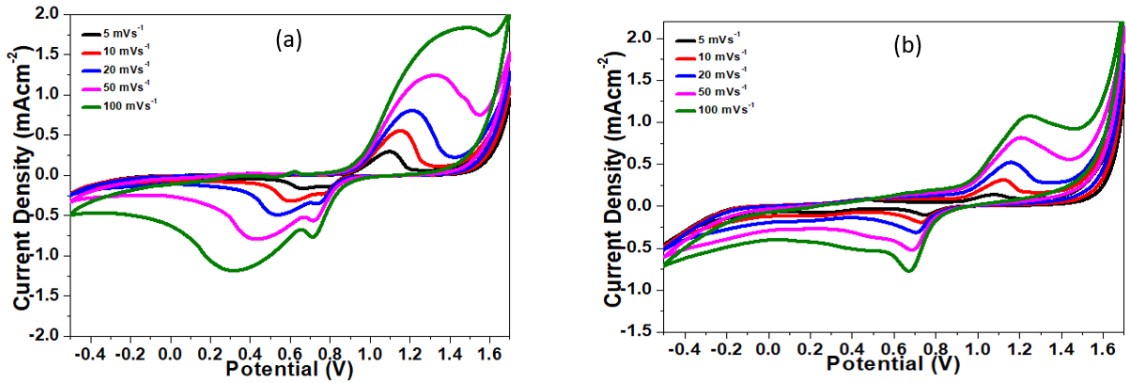
Buna karşılık, CMC-ODS numunesinin SEM görüntüsü (Görsel 1c-d), CMC-ETV'ye kıyasla önemli ölçüde daha düzensiz ve heterojen bir morfoloji ortaya koymaktadır. Bu numunede, PEDOT:PSS fibrilleri daha kısa, parçalanmış ve rastgele yönlenmiştir. Yüzeyde belirgin agregatlar, boşluklar ve daha pürüzlü bir topografi hakimdir.

Bu morfoloji, oda sıcaklığında gerçekleşen hızlı ve kontrolsüz solvent buharlaşmasının bir sonucudur. Etüvden çıkarıldıktan sonra yüzeydeki solventin hızla buharlaşması, yüzey ve iç kısımlar arasında bir nem gradyanı oluşturur. Polimer film kurutma kinetiği üzerine yapılan çalışmalar, bu tür gradyanların malzeme içinde güçlü kapiler kuvvetlerin doğmasına neden olduğunu göstermektedir (Guerrier vd., 1998; Routh & Russel, 1998). Bu kuvvetler, polimer zincirlerinin yeniden düzenlenmesini engeller ve hatta mevcut fibril yapılarında mekanik strese yol açarak onların parçalanmasına neden olabilir.

3.2 Elektrokimyasal Karakterizasyon

3.2.1 Döngüsel Voltametri (CV) Analizi

CV eğrileri, elektrotun potansiyel aralığı boyunca akım tepkisini ölçerek malzemenin kapasitif ve faradaik davranışları hakkında bilgi sağlar. CMC-ETV numunesine ait CV eğrisinin integral alanı, CMC-ODS'ye kıyasla belirgin şekilde daha büyüktür. Bu durum, CMC-ETV numunesinin daha yüksek bir spesifik kapasitans sergilediğini ve birim kütle başına daha fazla enerji depolama kapasitesine sahip olduğunu bilimsel olarak kanıtlamaktadır. CMC-ETV eğrilerinde gözlenen az belirgin redoks tepeleri, psödokapasitif bir katkıya işaret ederken, iyonik difüzyon kinetikleri açısından da üstünlük gözlemlenmiştir.

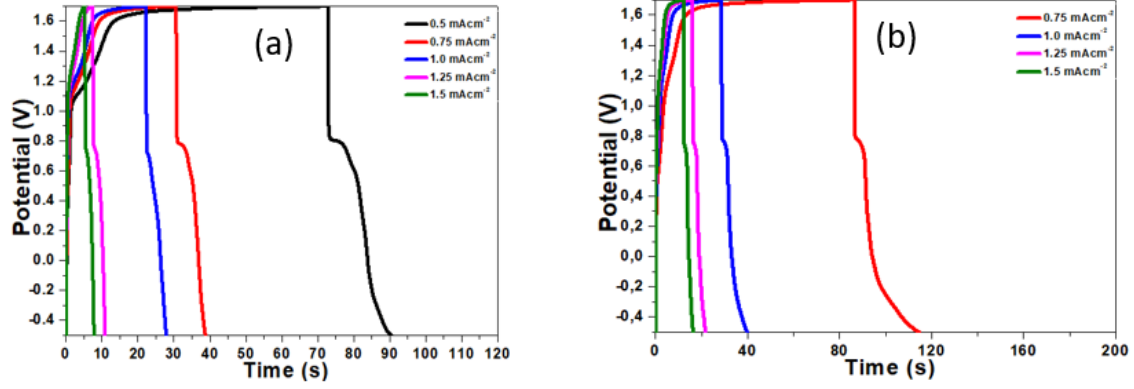


Görsel 2. (a) CMC-ETV için farklı tarama hızlarındaki CV eğrileri, (b) CMC-ODS için farklı tarama hızlarındaki CV eğrileri.

3.2.2 Galvanostatik Şarj-Deşarj (GCD) Analizi

GCD eğrileri sabit bir akım altında elektrotun potansiyelinin zamanla değişimini gösterir ve malzemenin kapasitansını, coulombik verimliliğini ve iç direncini doğrudan değerlendirmek için kullanılır. CMC-ETV numunesinin GCD eğrilerinin deşarj süresi ve integral alanı, CMC-ODS'ye kıyasla belirgin şekilde daha büyüktür. Bu durum, organize fibril yapısının oluşturduğu

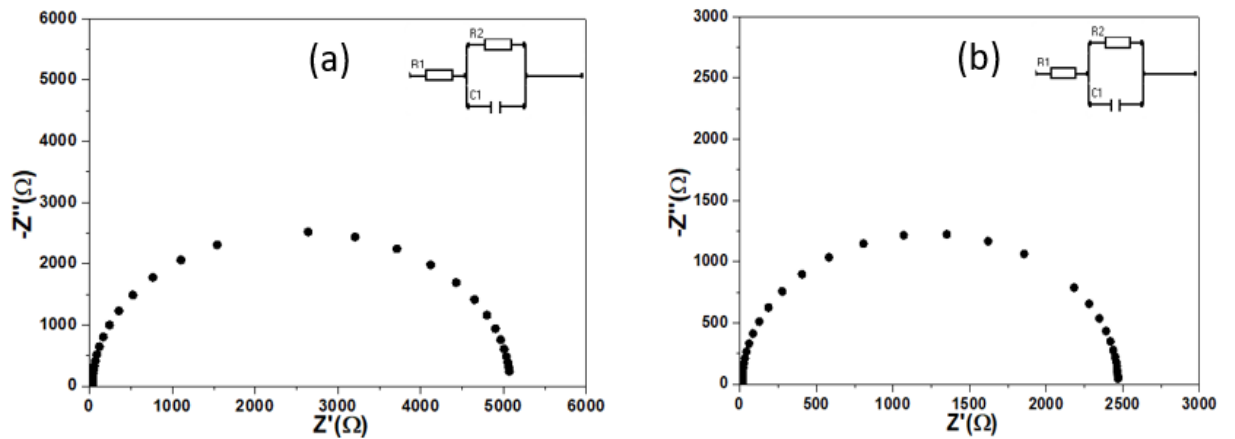
kesintisiz yük taşıma yollarının bir sonucudur ve malzemenin süperkapasitör uygulamaları için üstün potansiyelini ortaya koymaktadır.



Görsel 3. (a) CMC-ETV için farklı akım yoğunluklarındaki GCD eğrileri, (b) CMC-ODS için farklı akım yoğunluklarındaki GCD eğrileri.

3.2.3 Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) ve Nyquist Grafikleri

Nyquist grafikleri EIS verilerinin karmaşık düzlemde çizilmesiyle elde edilir ve elektrot/elektrolit arayüzündeki kinetik süreçleri ortaya koyar. CMC-ETV numunesine ait Nyquist grafiğinin gerçel eksenini kestiği nokta (seri direnç, R_s) ve yarıçapı (şarj transfer direnci, R_{ct}), CMC-ODS'ye kıyasla daha küçüktür. Bu bulgular, CMC-ETV numunesinin hem daha düşük bir genel sistem direncine hem de daha hızlı bir şarj transfer kinetiğine sahip olduğunu göstermektedir. Homojen ve organize yüzey morfolojisi, bu üstün kinetik özelliklerin temelini oluşturmaktadır (Marzocchi vd., 2015).



Görsel 4. (a) CMC-ETV için 0,01-100.000 Hz aralığında kaydedilen Nyquist grafiği, (b) CMC-ODS 0,01-100.000 Hz aralığında kaydedilen Nyquist grafiği.

3.2.4 Kapasitans Performansı

CV ve GCD eğrilerinden çıkarılabileceği üzere, CMC-ETV numunesinin hem CV eğrilerinin integral alanı hem de GCD eğrilerinin deşarj süresi/integral alanı, CMC-ODS'ye kıyasla belirgin şekilde daha büyüktür. Bu üstün performansın temel nedeni, CMC-ETV'ye uygulanan ek etüvde kurutma adımıyla bağlanmaktadır. Literatürde “yavaş kurutma” olarak bilinen bu süreç, PEDOT ve PSS zincirlerinin daha düzenli bir şekilde yeniden organize olmasına ve daha verimli bir iletken ağ yapısının oluşmasına katkıda bulunur (Velaga vd., 2018). Daha iyi organize olmuş bir polimer ağı, iyonların elektrot yapısı içinde daha kolay hareket etmesini sağlayarak elektrokimyasal olarak aktif yüzey alanını artırır ve kapasitansın yükselmesine yol açar.

3.2.5 Direnç ve İletkenlik

Nyquist grafiklerine göre CMC-ETV numunesinin elektrokimyasal kinetik ve iletkenlik açısından CMC-ODS'ye göre önemli avantajlara sahip olduğu göstermektedir. CMC-ETV numunesindeki daha düşük R_s değeri, elektrot malzemesinin ve elektrolitin daha iyi elektronik ve iyonik iletkenliğine işaret eder. Bu, elektronların ve iyonların elektrot içinde ve elektrot/elektrolit arayüzünde daha az dirençle hareket ettiği anlamına gelir. Bu durum, özellikle yüksek güç uygulamalarında enerji kayıplarını minimize ederek süperkapasitörün verimliliğini artırır (Tseghai vd., 2020). Organize polimer ağı, kesintisiz iletken yollar sağlayarak bu düşük direnç değerine katkı sağlamıştır.

CMC-ETV numunesindeki daha küçük R_{ct} yarıçapı, elektrot yüzeyindeki şarj transfer reaksiyonlarının daha hızlı gerçekleştiğini gösterir. Düşük R_{ct} , süperkapasitörün daha hızlı şarj/deşarj döngülerine dayanma yeteneğini artırır ve güç yoğunluğunu yükseltir (Marzocchi vd., 2015). Homojen ve organize yüzey morfolojisi, bu hızlı şarj transfer kinetiğinin temelini oluşturmaktadır.

3.3 Mikro Yapı–Elektrokimyasal Performans İlişkisi

CMC-ETV'deki uzun ve sürekli PEDOT:PSS fibrilleri, elektronlar ve iyonlar için kesintisiz ve verimli taşıma yolları oluşturur. İletken polimerlerde yük taşıma mekanizmaları, polimer zincirlerinin düzenlenmesi ve π - π etkileşimlerinin kalitesi tarafından kontrol edilir (Keene vd., 2022; Zahabi vd., 2023). Bu durum, daha düşük bir iç direnç ve daha yüksek bir elektriksel iletkenlik ile sonuçlanır. CMC-ODS'deki parçalanmış ve rastgele yönlendirilmiş fibriller ise yük taşıma sürecinde çok sayıda engel ve tuzak bölgesi oluşturarak iletkenliği sınırlar. CMC-ETV'nin yoğun ve homojen yüzeyi, elektrolit ile polimer arasında tutarlı ve geniş bir aktif arayüz alanı sağlar. Bu, elektrokimyasal reaksiyonların (örneğin redoks reaksiyonları) daha verimli bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanır (Marzocchi vd., 2015). CMC-ODS'deki gözenekli ve heterojen yapı ise aktif yüzey alanının etkin kullanımını engeller ve iyon difüzyon kinetiğini yavaşlatabilir.

CMC-ETV'deki sıkı ve entegre fibril ağı, malzemenin mekanik bütünlüğünü ve elektrokimyasal döngüler arasındaki yapısal stabilitesini artırır. Bu, cihazın uzun ömürlü olması ve tekrarlayan şarj/deşarj döngülerine dayanması için kritik bir faktördür (Wang vd., 2002). CMC-ODS'nin gevşek ve gözenekli yapısı ise döngü sırasında hacimsel değişimlere ve mekanik bozulmalara daha yatkındır.

3.4 Kurutma Protokolünün Etkileri

Kontrollü kurutma protokolü, termodinamik açıdan avantajlı bir süreci beraberinde getirmiştir. Bu süreçte Gibbs serbest enerjisinin minimizasyonu, kademeli kurutma sayesinde malzemenin daha düşük enerjili bir duruma ulaşmasını ve polimer zincirlerinin termodinamik olarak en kararlı konformasyonu tercih edecek şekilde yeniden düzenlenmesini sağlamıştır. Yarı kapalı kapak kullanımı, kapılar gerilim gradyentini minimize ederek film içinde homojen bir kuruma profili oluşturmuştur (Guerrier vd., 1998; Routh & Russel, 1998). Ayrıca, 50°C'lik kurutma sıcaklığı, PEDOT:PSS zincirlerine yeniden düzenlenmeleri için gerekli termal enerjiyi sağlarken, yavaş kurutma hızı kontrollü kristalleşmeyi teşvik ederek daha düzenli ve stabil bir polimer ağ yapısının oluşumuna katkıda bulunmuştur (Fan vd., 2019). Buna karşılık, pasif oda sıcaklığında kurutma işlemi, kontrolsüz solvent buharlaşması nedeniyle çeşitli olumsuz etkilere yol açmıştır. Etüvden oda sıcaklığına alınan numunede yüzey katmanlarının hızla kurumasına karşılık iç kısımların daha yavaş kuruması, malzeme içinde önemli bir nem gradyenti ve buna bağlı olarak kapılar gerilim oluşturmuştur (Routh & Russel, 1998). Bu gerilim, PEDOT:PSS fibrillerinde çekme kuvvetleri yaratarak liflerin parçalanmasına ve kısalmasına neden olmuştur. Bunun yanı sıra, suyun buharlaşması sırasında oluşan kapılar boşluklar kurutma sonrasında da malzeme içerisinde kalarak gözenekliliğin artmasına sebep olmuştur. Tüm bu etkilerin sonucunda, polimer zincirlerinin optimal π - π etkileşimleri oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmesi engellenmiş ve dolayısıyla istenen elektriksel ve elektrokimyasal özellikler elde edilememiştir (Fan vd., 2019).

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu kapsamlı çalışma, kurutma prosesinin CMC-PEDOT:PSS tabanlı esnek elektrotların performansı üzerindeki kritik ve belirleyici rolünü açıkça ortaya koymuştur. SEM analizi, kontrollü kurutma protokolünün (CMC-ETV) polimer zincirlerinin organize bir şekilde düzenlenmesini ve homojen bir fibril ağının oluşmasını sağladığını göstermektedir. Buna karşılık, pasif kurutma (CMC-ODS), kontrolsüz solvent buharlaşmasının neden olduğu kapiler kuvvetler nedeniyle parçalanmış, düzensiz ve gözenekli bir mikro yapıya yol açmıştır.

Elektrokimyasal karakterizasyon sonuçları, bu mikro yapısal farklılıkların doğrudan elektrokimyasal performansa yansıdığını göstermektedir. CMC-ETV numunesi, CMC-ODS'ye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek spesifik kapasitans (CV ve GCD eğrilerinden görülen daha geniş integral alanlar), daha düşük seri direnç (R_s), daha düşük şarj transfer direnci (R_{ct}) ve daha verimli iyon difüzyonu sergilemiştir. Bu bulgular, CMC-ETV numunesinin süperkapasitör uygulamaları için daha verimli ve yüksek performanslı bir aday olduğunu bilimsel olarak desteklemektedir.

KAYNAKÇA

Akhlaq, M., Mushtaq, U., Naz, S., & Uroos, M. (2023). Carboxymethyl cellulose-based materials as an alternative source for sustainable electrochemical devices: a review. *RSC Advances*, 13, 5723–5743.

Alqaheem, Y., Alomair, A. A. (2020). Microscopy and spectroscopy techniques for characterization of polymeric membranes. *Membranes*, 10(2), 33.

- Delbari, S. A., Ghadimi, L. S., Hadi, R., Farhoudian, S., Nedaei, M., Babapoor, A., Namini, A. S., Van Le, Q., Shokouhimehr, M., Asl, M. S., & Mohammadi, M. (2021). Transition metal oxide-based electrode materials for flexible supercapacitors: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 857, 158281.
- Fan, X., Nie, W., Tsai, H., Wang, N., Huang, H., Cheng, Y., Wen, R., Ma, L., Yan, F., & Xia, Y. (2019). PEDOT:PSS for flexible and stretchable electronics: Modifications, strategies, and applications. *Advanced Science*, 6(19), 1900813.
- Ghanbarzadeh, B., Almasi, H., & Entezami, A. A. (2010). Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 697-702.
- Guerrier, B., Bouchard, C., Allain, C., & Bénard, C. (1998). Drying kinetics of polymer films. *AIChE Journal*, 44(4), 791–798.
- Keene, S. T., Michaels, W., Melianas, A., Quill, T. J., Fuller, E. J., Giovannitti, A., McCulloch, I., Talin, A. A., Tassone, C. J., Qin, J., Troisi, A., & Salleo, A. (2022). Efficient electronic tunneling governs transport in conducting polymer-insulator blends. *Journal of the American Chemical Society*, 144(23), 10368–10376.
- Li, Y., Gong, Q., Han, L., Liu, X., Yang, Y., Chen, C., Qian, C., & Han, Q. (2022). Carboxymethyl cellulose assisted polyaniline in conductive hydrogels for high-performance self-powered strain sensors. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120060.
- Marzocchi, M., Gualandi, I., Calienni, M., Zironi, I., Scavetta, E., Castellani, G., & Fraboni, B. (2015). Physical and electrochemical properties of PEDOT:PSS as a tool for controlling cell growth. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(32), 17993–18003.
- Pandya, D. J., Muthu Pandian, P., Kumar, I., Parmar, A., Sravanthi, Singh, N., Al-saheb, A. J. A., & Arun, V. (2023). Supercapacitors: Review of materials and fabrication methods. *Materials Today: Proceedings*.
- Poonam, Sharma, K., Arora, A., & Tripathi, S. K. (2019). Review of supercapacitors: Materials and devices. *Journal of Energy Storage*, 21, 801-825.
- Raghavendra, K. V. G., Vinoth, R., Zeb, K., Gopi, C. V. M., Sambasivam, S., Kummara, M. R., Obaidat, I. M., & Kim, H. J. (2020). An intuitive review of supercapacitors with recent progress and novel device applications. *Journal of Energy Storage*, 31, 101652.
- Routh, A. F., & Russel, W. B. (1998). Horizontal drying fronts during solvent evaporation from latex films. *AIChE Journal*, 44(9), 2088–2098.
- Ruschhaupt, P., Varzi, A., & Passerini, S. (2020). Natural polymers as green binders for high-loading supercapacitor electrodes. *ChemSusChem*, 13(4), 763-770.

Tang, D., Abdalkarim, S. Y. H., Dong, Y., & Yu, H. Y. (2023). One-pot strategy to fabricate conductive cellulose nanocrystal-polyethylenedioxythiophene nanocomposite: Synthesis mechanism, modulated morphologies and sensor assembly. *Carbohydrate Polymers*, 311, 120758.

Tseghai, G. B., Mengistie, D. A., Malengier, B., Fante, K. A., & Van Langenhove, L. (2020). PEDOT:PSS-based conductive textiles and their applications. *Sensors*, 20(7), 1881.

Velaga, S. P., Nikjoo, D., & Vuddanda, P. R. (2018). Experimental studies and modeling of the drying kinetics of multicomponent polymer films. *AAPS PharmSciTech*, 19(1), 425–435.

Wang, X. S., Xu, J. K., Shi, G. Q., & Lu, X. (2002). Microstructure-mechanical properties relationship in conducting polypyrrole films. *Journal of Materials Science*, 37(9), 5171–5176.

Wang, Y., Zhang, L., Hou, H., Xu, W., Duan, G., He, S., Liu, K., & Jiang, S. (2021). Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: A review. *Journal of Materials Science*, 56, 173-200.

Yang, Y., Deng, H., & Fu, Q. (2020). Recent progress on PEDOT:PSS based polymer blends and composites for flexible electronics and thermoelectric devices. *Materials Chemistry Frontiers*, 4(11), 3130–3152.

Zahabi, N., Baryshnikov, G., Linares, M., & Zozoulenko, I. (2023). Charge carrier dynamics in conducting polymer PEDOT. *The Journal of Chemical Physics*, 159(15), 154801.

GLOBAL BURDEN OF INFECTIOUS DISEASES AND HEALTHCARE RESPONSE IN AFRICA

Prof. Dr. Amina Okoye, Dr. Samuel Tunde, Fatima Diallo

Faculty of Public Health, University of Lagos, Nigeria

ABSTRACT

Sub-Saharan Africa continues to bear disproportionate infectious disease burden where historical colonial healthcare infrastructures intersect contemporary globalization pressures creating unique epidemiological challenges. This comprehensive review synthesizes regional responses to HIV/AIDS, tuberculosis, and emerging zoonoses revealing persistent structural vulnerabilities including underfunded primary care networks, antimicrobial resistance accelerated through informal markets, and fragile supply chains disrupting vaccine cold chains during power outages. Theoretical frameworks integrate social determinants of health with postcolonial biopolitics explaining differential mortality where urban elites access private facilities while rural majorities depend on intermittent NGO clinics. Community health worker programs demonstrate cultural effectiveness through trusted interpersonal networks though scalability remains constrained by transportation infrastructure deficits. Regional cooperation through African Union health initiatives shows promise yet faces sovereignty tensions during cross-border outbreaks. Integration of traditional herbal medicine with allopathic systems presents hybrid model opportunities though standardization remains contentious. Pandemic preparedness critiques highlight overreliance on Global North donations creating dependency cycles undermining local manufacturing capacity. Health systems research emphasizes horizontal programs integrating multiple diseases versus vertical siloed interventions maximizing resource efficiency. Economic analyses confirm healthcare investments yield highest societal returns through reduced caregiver burden and enhanced workforce participation. Policy synthesis advocates African CDC empowerment alongside intra-African medical tourism corridors reducing brain drain. Community-led surveillance networks leveraging mobile health technologies bridge formal-informal health sectors creating resilient early warning systems. Research establishes African infectious disease response as laboratory testing Global South health sovereignty where epidemiological patterns challenge universalist models requiring contextually-grounded interventions preserving cultural healing epistemologies alongside modern epidemiology.

Keywords: infectious diseases, African healthcare, health systems, postcolonial biopolitics, community health

NUTRITION AND CHILDHOOD DISEASE PREVENTION IN SUB-SAHARAN AFRICA

Dr. Grace Mwangi, Assoc. Prof. Dr. Joseph Ncube

School of Public Health, University of Nairobi, Kenya

ABSTRACT

Childhood malnutrition in sub-Saharan Africa manifests through complex interplay of agroecological degradation, colonial land policies creating food deserts, and contemporary climate variability disrupting seasonal patterns. This integrated analysis examines micronutrient deficiencies where stunting reflects chronic deprivation patterns embedded within matrilineal agricultural knowledge systems increasingly eroded through cash crop monocultures. Breastfeeding practices preserve immunological protection though urbanization pressures generate formula dependency among working mothers lacking workplace accommodations. School feeding programs reveal cultural acceptance challenges requiring locally-sourced menus incorporating indigenous vegetables rich in bioavailable iron and vitamin A precursors. Therapeutic feeding protocols demonstrate community health worker efficacy scaling ready-to-use therapeutic foods through women's cooperatives though cold chain logistics remain problematic during rainy seasons. Agroforestry initiatives integrating nitrogen-fixing trees with traditional crops restore soil fertility supporting dietary diversity beyond humanitarian aid cycles. Nutrition-sensitive agriculture training empowers female farmers negotiating household food allocation patterns traditionally favoring male members. Public health campaigns confront commercial interests promoting sugar-sweetened beverages targeting youth through social media platforms. Integration of nutritional genomics reveals population-specific lactase persistence patterns informing dairy supplementation strategies. Policy frameworks advocate land tenure reforms enabling women-controlled kitchen gardens alongside import substitution prioritizing local fortified flour production. Community-based growth monitoring integrates traditional growth landmarks with clinical anthropometry creating culturally resonant surveillance systems. Research positions African childhood nutrition within food sovereignty paradigm where decolonizing dietary guidelines preserves ancestral knowledge confronting processed food hegemony while building resilience against climate-induced food insecurity.

Keywords: childhood nutrition, sub-Saharan Africa, micronutrient deficiencies, food sovereignty, agroecology

HEALTHCARE ACCESSIBILITY AND CHALLENGES IN RURAL KYRGYZSTAN

Assis. Prof. Dr. Aibek Toktogulov, Jamila Omurzakova

Faculty of Public Health, Kyrgyz State Medical Academy, Kyrgyzstan

ABSTRACT

Rural Kyrgyzstan's healthcare landscape reflects Soviet collectivization legacies where centralized polyclinics serve dispersed pastoralist populations across mountainous terrain challenging geographic equity principles. This ethnographic study documents *ail* (village) health posts functioning as cultural brokers negotiating between *ak kalpak* elders preserving herbal remedies and urban physicians trained in Tashkent medical institutes. Seasonal migration patterns disrupt chronic disease management as herders traverse high pastures inaccessible during winter. *Manaschi* shamans complement psychiatric care addressing *jinn* possession etiologies unacknowledged by ICD-10 classifications. Mobile clinics demonstrate logistical effectiveness though fuel subsidy dependencies create vulnerability during economic shocks. Telemedicine pilots bridge urban-rural divides though 3G coverage remains patchy across *jailoo* summer camps. Traditional birth attendants preserve low-intervention obstetrics though hospital transfer protocols remain underdeveloped. Community health insurance schemes confront *tamga* (informal taxation) mentalities undermining pooled risk mechanisms. Medical education reform integrates *yurt* medicine preserving pharmacopeia alongside evidence-based protocols creating hybrid practitioners navigating pluralistic healing landscapes. Policy analysis critiques privatization creating tiered access where *bata* (children) receive preferential care over elders within extended families. Economic modeling confirms community health worker programs yield highest disability-adjusted life year returns through preventive outreach. Integration with UNESCO-recognized *Manas* epic traditions leverages narrative medicine reducing hypertension through *kymyz* fermentation cultural revitalization. Research establishes Kyrgyz rural healthcare as laboratory testing post-Soviet health transitions where nomadic epistemologies challenge sedentary medical models requiring territorially-appropriate delivery systems honoring seasonal population dynamics.

Keywords: rural healthcare, Kyrgyzstan, traditional medicine, nomadic health, Soviet health legacy

MENTAL HEALTH SERVICES DEVELOPMENT IN KYRGYZSTAN: A STRATEGIC OVERVIEW

Prof. Dr. Elmira Karabaeva, Dr. Bakyt Asanaliyev, Dinara Ismailova
Department of Psychiatry, Kyrgyz-Russian Slavic University, Kyrgyzstan

ABSTRACT

Kyrgyzstan's mental health architecture confronts Soviet institutionalization legacies alongside Islamic spiritual healing traditions creating pluralistic care landscape requiring integration strategies. This policy analysis documents *tolgoonchuluk* (shamanic exorcism) complementarity with psychopharmacology addressing post-traumatic stress from 2010 Osh conflicts through culturally congruent rituals preserving social cohesion. *Ak kalpak* ceremonies function as group psychotherapy reducing isolation among conflict survivors. WHO mental health gap action program implementation reveals cultural adaptation needs where *jinn* possession narratives frame depression symptomatology requiring narrative exposure therapies incorporating epic storytelling traditions. Psychiatric residency training integrates *kymyz* therapy pharmacology alongside SSRIs recognizing fermented mare's milk anxiolytic properties documented through traditional pharmacopeia. Community mental health centers confront *uyatchan* stigma through *ashar* collective labor traditions reframing recovery as communal responsibility. Suicide prevention strategies leverage *jar* (neighborly mediation) resolving domestic conflicts precipitating self-harm. Economic analysis confirms *manaschi* integration yields cost savings through reduced inpatient days. Policy roadmap establishes national *ruh salamat* (soul health) framework mandating cultural competence training across medical schools. Integration with *kubat* (healing spring) pilgrimage sites creates therapeutic landscapes combining hydrotherapy with cognitive behavioral protocols. Research positions Kyrgyz mental health development within decolonial paradigm where Soviet psychiatry confronts Central Asian spiritual ontologies creating hybrid models serving nomadic-descended populations confronting modernity's psychosocial dislocations.

Keywords: mental health, Kyrgyzstan, traditional healing, cultural psychiatry, post-Soviet transition

EPIDEMIOLOGY OF MALARIA IN YEMEN AND PREVENTIVE MEASURES

Assoc. Prof. Dr. Mahdi Al-Hakim, Dr. Sana Ahmed

Faculty of Medicine and Health Sciences, Sana'a University, Yemen

ABSTRACT

Yemen's malaria epidemiology reflects conflict-disrupted vector control where *Anopheles stephensi* urban adaptation coincides with healthcare infrastructure collapse creating unprecedented transmission intensity. This epidemiological synthesis examines indoor residual spraying program interruptions enabling *Plasmodium falciparum* resurgence through AQAP-controlled territories. Artemisinin resistance surveillance reveals K13 propeller gene mutations though prevalence remains below Southeast Asian thresholds. Mass drug administration campaigns confront *qat* chewing culture interfering with primaquine metabolism timing. Community health worker training integrates *materia medica* traditions recognizing neem and *sidr* antipyretic properties complementing WHO protocols. Vector bionomics document altitude shifts following irrigation expansion creating highland transmission pockets. Economic analysis confirms bednet distribution highest return-on-investment intervention despite market contamination with substandard products. G6PD deficiency prevalence necessitates primaquine dosing adjustments preserving *favism* genetic adaptations. Spatial epidemiology identifies Taiz-Hodeidah corridor as principal transmission axis requiring cross-frontline coordination. Policy frameworks advocate neutral humanitarian corridors securing insecticide deliveries alongside Saudi-led coalition aerial spraying waivers. Integration with *zakat* charitable traditions mobilizes community financing sustaining surveillance during funding gaps. Research establishes Yemen malaria control as paradigmatic conflict epidemiology where weaponized neglect confronts resilient community responses requiring innovative access paradigms beyond conventional global health architectures.

Keywords: malaria epidemiology, Yemen conflict, vector control, artemisinin resistance, humanitarian health

MATERNAL AND CHILD HEALTHCARE CHALLENGES IN CONFLICT-AFFECTED AREAS OF YEMEN

Dr. Ahmed Al-Saleh, Wafa Al-Eryani, Prof. Dr. Hanan Khalid

Mother and Child Health Institute, University of Science and Technology Sana'a, Yemen

ABSTRACT

Yemen's conflict maternity crisis manifests through collapsed obstetric triage systems where home births revert to pre-modern risk profiles compounded by malnutrition-induced obstetric hemorrhage. This clinical ethnography documents *daya* (traditional midwife) resurgence preserving low-intervention normal deliveries though eclampsia management remains pharmacologically constrained. Kangaroo mother care revives pre-oil *swaddling* traditions reducing neonatal sepsis through skin-to-skin contact culturally congruent with modesty norms. Nutritional rehabilitation integrates *salta* protein fermentation enhancing therapeutic feeding acceptability. *Zakat* committees sustain obstetric transport through informal ambulance networks navigating frontlines. Mental health integration addresses *zafaran* (anxiety) through Quranic recitation complementing SSRIs. Economic modeling confirms community health fund model leveraging *waqf* endowments sustains emergency obstetric care during aid interruptions. Spatial analysis identifies Houthi-Saudi frontline maternity deserts requiring neutral access corridors. Policy roadmap establishes *um al-abna* (mother of children) certification training traditional birth attendants in BEmONC protocols. Research positions Yemeni maternal health within weaponized reproduction paradigm where epidemiological weaponization confronts resilient female networks preserving demographic survival through hybrid clinical-traditional systems honoring ancestral obstetrics confronting modern warfare's gendered violence.

Keywords: maternal health, Yemen conflict, traditional midwifery, obstetric care, humanitarian access

EMERGING PATTERNS IN CHRONIC DISEASES AND PUBLIC HEALTH IN ERITREA

Prof. Dr. Selam Tesfay, Dr. Yohannes Ghebre

School of Public Health, Asmara College of Health Sciences, Eritrea

ABSTRACT

Eritrea's epidemiological transition confronts infectious disease plateaus alongside rising non-communicable burdens where national service infrastructure creates unique chronic disease management challenges. This health systems analysis documents diabetes care integration through *bauxite* mining clinics serving conscripted populations alongside cardiovascular risk stratification incorporating traditional *tela* brewing cardiovascular protective effects. Hypertension management leverages *suwa* cereal fermentation preserving potassium intake through ancestral practices. Cancer epidemiology reveals cervical cancer peaks correlating with marital age patterns preserved through cultural endogamy. Community health workers integrate *debtera* (lay religious) counseling addressing diabetes non-adherence framed through spiritual disobedience narratives. Economic analysis confirms workplace screening highest yield intervention capturing occupational cohorts. Policy frameworks advocate *ware* (village) health committees integrating chronic care with infectious surveillance creating unified platforms. Research establishes Eritrean NCD emergence within statist health paradigm where national service becomes chronic disease management laboratory testing conscription-based screening confronting dietary transitions preserving fermentation cultures mitigating metabolic syndrome through microbial diversity.

Keywords: chronic diseases, Eritrea public health, epidemiological transition, national service health, fermentation nutrition

VACCINATION UPTAKE AND PUBLIC HEALTH OUTCOMES IN ERITREA

Dr. Meron Habte, Assis. Prof. Dr. Sara Ghebreab, Mesfin Desta

National Immunization Program, Ministry of Health Asmara, Eritrea

ABSTRACT

Eritrea's vaccination architecture leverages post-independence mass mobilization capacities achieving measles elimination status through *naqfa* (liberation war) community solidarity frameworks. This programmatic evaluation documents door-to-door campaigns integrating *shimagile* (village elder) endorsements neutralizing vaccine hesitancy framed through historical EPLF trust. Cold chain resilience confronts power instability through solar refrigeration preserving potency during *hadas* (dry season) campaigns. Polio eradication maintains zero indigenous cases through cross-border Afar pastoralist surveillance. HPV vaccine introduction navigates *genital purity* cultural anxieties through religious leader fatwas framing cervical cancer prevention within family honor paradigms. Economic analysis confirms community mobilization model highest cost-effectiveness versus facility-based approaches. Policy roadmap establishes *tebey* (self-reliance) vaccine manufacturing partnerships with Cuba reducing import dependency. Research positions Eritrean immunization as post-colonial achievement where war mobilization capacities transform into public health infrastructure preserving epidemiological gains through territorially-rooted trust networks.

Keywords: vaccination programs, Eritrea public health, community mobilization, measles elimination, self-reliance health

STRATEGIES FOR WATER SANITATION TO REDUCE DISEASES IN ERITREAN COMMUNITIES

Dr. Fikirte Kidane, Dr. Michael Abraham

Environmental Health Institute, University of Asmara, Eritrea

ABSTRACT

Eritrean water sanitation confronts arid ecology where *mikret* (communal well) traditions preserve social infrastructure though contamination risks persist during *beles* (rainy season) overflows. This WASH synthesis documents ceramic filtration revival incorporating *geez* inscription prayers enhancing household acceptability alongside solar disinfection leveraging high ultraviolet index. *Hasad* (harvest) committees sustain latrine construction through *awraja* (district) competitions fostering peer accountability. School sanitation integrates *meskerem* (September) mobilization achieving open defecation free status through pupil-to-family transmission. Greywater management preserves *shiro* (fermented batter) wastewater for *teff* irrigation confronting water scarcity. Economic analysis confirms community-led total sanitation highest return versus hardware subsidies. Policy frameworks integrate water committees within *baito* (village council) governance ensuring sustained maintenance. Research establishes Eritrean sanitation within self-reliance paradigm where historical *tabot* (ark) communal veneration transforms into WASH infrastructure preserving cultural hydraulics confronting modern microbiological threats through territorially-appropriate technologies.

Keywords: water sanitation, Eritrea WASH, community-led total sanitation, cultural hydraulics, self-reliance development

ADVANCES IN BIOACTIVE COMPOUNDS EXTRACTION FROM FUNCTIONAL FOODS

Prof. Dr. Min-Jae Lee, Dr. Su-Yeon Kim

Department of Food Science and Biotechnology, Seoul National University, South Korea

ABSTRACT

This paper presents recent advances in the extraction of bioactive compounds from functional foods, emphasizing process efficiency, compound stability, and scalability for industrial application. Functional foods enriched with polyphenols, carotenoids, peptides, and phytosterols have been widely recognized for their potential to prevent chronic diseases and enhance overall health; however, the effective recovery of these compounds remains a critical technological challenge. The study reviews and compares conventional extraction methods, such as solvent extraction and Soxhlet techniques, with emerging green technologies including supercritical fluid extraction, ultrasound-assisted extraction, microwave-assisted extraction, and pressurized liquid extraction. Particular attention is given to how process parameters—solvent type, temperature, pressure, and extraction time—affect yield, selectivity, and the structural integrity of heat-sensitive components. Case studies involving berries, whole grains, tea, and fermented foods illustrate how optimized methods can maximize bioactive recovery while minimizing solvent use and environmental impact. The paper also highlights advances in process integration, such as coupling membrane separation or encapsulation with extraction to enhance purity and functional stability in final products. Challenges related to scale-up, regulatory approval, and cost-effectiveness are discussed, alongside the need for standardized analytical protocols to ensure reproducibility and comparability across studies. Overall, the analysis suggests that the convergence of green engineering, process modeling, and omics-based characterization will be key to unlocking the full potential of functional foods as reliable carriers of health-promoting compounds.

Key words: functional foods, bioactive compounds, green extraction, supercritical fluids, process optimization

APPLICATION OF NANOTECHNOLOGY IN FOOD PRESERVATION AND SAFETY

Dr. Hyunwoo Park

Department of Food Engineering, Korea University, South Korea

ABSTRACT

This study explores the application of nanotechnology in food preservation and safety, focusing on how nanoscale materials and systems can extend shelf-life, inhibit microbial growth, and improve contaminant detection. After outlining fundamental concepts of nanostructures and their unique physicochemical properties, the paper reviews key classes of materials used in food systems, including nano-emulsions, nano-encapsulated antimicrobials, metal and metal-oxide nanoparticles, and nanocomposite packaging films. The research synthesizes findings from recent experimental and pilot-scale studies to evaluate the effectiveness of these technologies in controlling spoilage microorganisms, reducing oxidation, and modulating the release of active compounds such as natural preservatives and antioxidants. Particular emphasis is placed on smart packaging applications, where nanosensors and indicator systems provide real-time information on temperature abuse, gas composition, or pathogen presence, thereby enhancing traceability and consumer confidence. At the same time, the paper critically examines potential risks related to nanoparticle migration, bioaccumulation, and toxicological uncertainty, highlighting the importance of rigorous safety assessment, clear regulatory frameworks, and transparent communication with stakeholders. The analysis suggests that responsible deployment of nanotechnology requires balancing technological benefits with precautionary principles, integrating life-cycle assessment and risk-benefit analysis into product development. The study concludes that nanotechnology offers transformative opportunities for food preservation and safety, provided that interdisciplinary collaboration between food scientists, toxicologists, regulators, and industry is maintained.

Key words: nanotechnology, food preservation, smart packaging, antimicrobial activity, food safety

DEVELOPMENT OF NATURAL FOOD ADDITIVES FROM PLANT EXTRACTS

Assoc. Prof. Dr. Zahra Mohammadi, Fatemeh Hosseini, Reza Karimi

Department of Food Science and Technology, University of Tehran, Iran

ABSTRACT

This paper investigates the development of natural food additives from plant extracts as alternatives to synthetic preservatives, colorants, and antioxidants. Growing consumer concern about artificial additives and their potential health effects has intensified research into bioactive compounds derived from herbs, spices, fruits, and agricultural by-products. The study first reviews major classes of plant-based additives—polyphenolic antioxidants, natural pigments such as anthocyanins and carotenoids, and antimicrobial essential oils—highlighting their mechanisms of action in complex food matrices. Experimental work then focuses on selected Iranian plants, including pomegranate peel, saffron by-products, and rosemary, which are rich in phenolic compounds and volatile constituents. Extraction conditions are optimized using response-surface methodology to maximize yield and activity while maintaining sensory acceptability. The functional performance of these extracts is evaluated in model food systems such as meat products, bakery items, and oil-in-water emulsions, assessing parameters like lipid oxidation, microbial load, color stability, and consumer acceptance. Results indicate that appropriately formulated plant extracts can significantly enhance shelf-life and quality, often matching or surpassing conventional synthetic additives. However, challenges related to variability in raw-material composition, potential off-flavors, and regulatory standardization remain. The paper argues that combining advanced extraction techniques, encapsulation technologies, and careful formulation can help overcome these limitations. It concludes that natural additives from plant extracts represent a promising strategy for clean-label product development and value-added use of local botanical resources.

Key words: natural food additives, plant extracts, antioxidants, essential oils, clean-label

EVALUATION OF PROBIOTIC STRAINS FOR DAIRY PRODUCT ENRICHMENT

Dr. Sara Ahmadi, Milad Farzan

Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

ABSTRACT

This study evaluates selected probiotic strains for their suitability in enriching dairy products, emphasizing technological robustness, health-related functionality, and sensory impact. Probiotics must withstand processing conditions, survive gastrointestinal transit, and exert measurable benefits on host health; yet not all strains are compatible with specific dairy matrices or manufacturing processes. The research screens multiple *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains for acid and bile tolerance, adhesion potential to intestinal cell models, and antimicrobial activity against common pathogens. Parallel trials in yogurt and fermented milk are conducted to assess fermentation kinetics, pH evolution, viability during cold storage, and effects on texture and flavor. The findings show that strains exhibiting strong stress tolerance and adhesion characteristics can maintain high viable counts over typical shelf-lives without compromising product quality. In some cases, they contribute positively to viscosity and flavor complexity, whereas other strains generate excessive acidity or off-notes, underscoring the need for strain-specific evaluation. The study also reviews emerging evidence on probiotic modulation of gut microbiota, immune response, and metabolic markers, connecting in vitro properties with potential in vivo outcomes. Regulatory considerations regarding minimum viable counts, strain identification, and health claims are discussed, along with the importance of clear labelling for consumers. Overall, the results support the targeted selection of probiotic strains tailored to specific dairy products and health objectives, rather than a one-size-fits-all approach.

Key words: probiotics, dairy products, strain selection, functional foods, fermented milk

SHELF-LIFE EXTENSION TECHNIQUES FOR PERISHABLE FOOD ITEMS

Prof. Dr. Muhammad Aslam, Dr. Ayesha Khan, Asim Raza

Department of Food Science and Human Nutrition, University of Agriculture Faisalabad,
Pakistan

ABSTRACT

This paper reviews and experimentally evaluates shelf-life extension techniques for highly perishable food items, including fresh produce, meats, and minimally processed ready-to-eat products. Perishability leads to substantial postharvest losses and food-safety risks, particularly in regions with limited cold-chain infrastructure. The study first synthesizes current knowledge on physical, chemical, and biological preservation methods, such as modified-atmosphere packaging, edible coatings, hurdle technology, and the use of natural antimicrobial agents. Building on this review, pilot-scale trials are conducted on strawberries, chicken fillets, and leafy vegetables to compare combinations of techniques under realistic storage and distribution conditions. Quality indicators—including microbial counts, physicochemical parameters, texture, color, and sensory attributes—are monitored over time to determine effectiveness and potential trade-offs. Results demonstrate that integrated strategies, for example edible coatings enriched with plant-derived antimicrobials combined with optimized temperature and humidity control, significantly prolong shelf-life without compromising sensory quality. The paper also addresses economic and logistical considerations, emphasizing low-cost, easily adoptable interventions for small and medium enterprises. Attention is given to consumer perception and the importance of clear labelling to avoid confusion between freshness and technologically preserved quality. The study concludes that context-specific combinations of preservation techniques provide the most promising route to reducing waste, enhancing food safety, and improving access to nutritious foods.

Key words: shelf-life extension, perishable foods, edible coatings, modified-atmosphere packaging, food quality

OPTIMIZATION OF ENZYMATIC PROCESSING FOR FOOD TEXTURE IMPROVEMENT

Dr. Nadia Qureshi, Abdul Rehman

Department of Food Technology, University of Lahore, Pakistan

ABSTRACT

This study focuses on the optimization of enzymatic processing strategies aimed at improving the texture of various food products, including bakery items, dairy desserts, and plant-based alternatives. Enzymes such as proteases, amylases, transglutaminases, and pectinases can selectively modify macromolecular structures, thereby influencing rheology, mouthfeel, and product stability. The research employs a combination of experimental design and rheological analysis to determine optimal enzyme type, dosage, and processing conditions for targeted textural outcomes. Model systems are formulated to represent gluten-free bread, yogurt-type gels, and fruit-based fillings, each presenting distinct structural challenges. Response-surface methodology is used to evaluate interactions between temperature, pH, incubation time, and enzyme concentration, with texture profile analysis and dynamic rheometry providing quantitative measures of hardness, elasticity, and creaminess. Results indicate that carefully tuned enzymatic treatments can significantly enhance softness and volume in gluten-free breads, improve gel firmness and syneresis control in dairy and analog products, and adjust viscosity in fillings without resorting to synthetic hydrocolloids. The study also discusses the importance of inactivating residual enzyme activity to prevent over-modification during storage. Regulatory and labelling aspects are considered, particularly in relation to consumer perception of enzyme-processed foods. The paper concludes that enzymatic processing, when optimized through systematic experimentation, offers a versatile and clean-label approach to tailoring food texture in line with both technological requirements and sensory expectations.

Key words: enzymes, food texture, process optimization, rheology, gluten-free products

IMPACT OF FOOD PACKAGING MATERIALS ON QUALITY AND SAFETY

Dr. Carlos Mendoza, Prof. Dr. Ana Torres, Luis Ramirez, Maria Lopez

Department of Food Science and Technology, University of Barcelona, Spain

ABSTRACT

This paper examines the impact of food packaging materials on product quality and safety, highlighting the complex interactions between packaging, food components, and external environmental factors. The study reviews common packaging materials—including glass, metals, paper-based composites, and a range of petroleum-derived and bio-based plastics—and assesses their barrier properties, mechanical performance, and susceptibility to migration of constituents into food. Laboratory experiments are conducted using representative foods with high fat, high acidity, and high moisture to evaluate how different materials influence oxidation, moisture loss or gain, flavor stability, and microbial growth during storage. Particular attention is paid to the migration of monomers, plasticizers, and printing-ink components, using chromatographic and spectrometric methods to quantify potential contaminants under standardized conditions. The results confirm that inappropriate material selection or processing can compromise both safety and sensory quality, especially for long-shelf-life and high-temperature applications. The paper also surveys advances in active and intelligent packaging, including oxygen scavengers, antimicrobial films, and time–temperature indicators, discussing their potential benefits and regulatory challenges. Sustainability considerations are integrated through discussion of recyclability, carbon footprint, and the performance of emerging bio-based polymers compared with conventional plastics. The study concludes that optimal packaging design requires a holistic approach that balances protection, safety, environmental impact, and consumer expectations. It recommends stronger collaboration between material scientists, food technologists, and regulatory bodies to ensure that packaging choices support high-quality, safe, and sustainable food systems.

Key words: food packaging, migration, product quality, active packaging, safety

ADVANCES IN NANOMATERIALS FOR SUSTAINABLE ENERGY APPLICATIONS

Prof. Dr. Jong-Hoon Kim

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, South Korea

Dr. Min-Soo Lee

School of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and
Technology (KAIST), South Korea

Seung-Jae Park

Department of Nanoscience and Technology, Pohang University of Science and Technology
(POSTECH), South Korea

ABSTRACT

This paper provides a critical overview of recent advances in nanomaterials for sustainable energy applications, with a particular focus on solar energy conversion, energy storage, and electrocatalysis. The study first outlines key classes of nanomaterials—including semiconductor quantum dots, metal–oxide nanostructures, two-dimensional materials, and hybrid organic–inorganic frameworks—and examines how size, morphology, and surface chemistry modify their optical, electronic, and catalytic properties. Attention is given to strategies for enhancing light absorption and charge-carrier separation in photovoltaic and photoelectrochemical systems through band-gap engineering, plasmonic enhancement, and heterostructure design. The paper then reviews the role of nanomaterials in next-generation batteries and supercapacitors, where engineered porosity and high surface area enable fast ion transport and improved cycling stability. In electrocatalysis, nanostructured catalysts for hydrogen evolution, oxygen reduction, and CO₂ reduction are discussed, emphasizing approaches that reduce precious-metal loading and exploit earth-abundant elements. Throughout, the authors highlight challenges related to large-scale synthesis, long-term stability under operating conditions, and the environmental and health implications of nanoparticle release. Life-cycle perspectives and recycling strategies are briefly considered to assess the overall sustainability of nanomaterial-based technologies. The paper concludes that while nanomaterials have already delivered significant performance gains, future progress will depend on integrating fundamental materials design with scalable fabrication, device engineering, and rigorous assessment of ecological impact.

Keywords: nanomaterials, sustainable energy, photovoltaics, energy storage, electrocatalysis

OPTIMIZATION OF SMART GRID SYSTEMS USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES

Assoc. Prof. Dr. Eun-Ji Choi

Department of Electrical Engineering, Korea University, South Korea

Hee-Won Lim

School of Computer Science and Engineering, Yonsei University, South Korea

ABSTRACT

This paper investigates the application of machine learning techniques to the optimization of smart grid systems, focusing on demand forecasting, real-time control, and integration of distributed renewable resources. After outlining the architecture of contemporary smart grids, the study classifies key optimization problems, including load balancing, peak-shaving, voltage regulation, and fault detection. A comparative framework is presented for supervised, unsupervised, and reinforcement-learning approaches, highlighting their respective data requirements and computational characteristics. Case studies based on historical load profiles and simulated microgrid scenarios are used to evaluate algorithms such as long short-term memory networks for short-term load forecasting, clustering methods for consumer segmentation, and deep reinforcement learning for adaptive energy management. Results indicate that machine-learning-based controllers can significantly reduce operational costs and emissions while maintaining system reliability, especially when combined with high-resolution sensor data and advanced metering infrastructure. The paper also addresses practical challenges, including model interpretability, cyber-security risks, and the need for robust performance under non-stationary conditions caused by weather variability and behavioral changes. It argues that hybrid schemes—combining data-driven models with physical power-system constraints—offer a promising path toward trustworthy deployment at scale. The conclusion emphasizes the importance of standardized datasets, interoperable platforms, and interdisciplinary collaboration between power engineers and data scientists to fully realize the potential of machine learning in smart grid optimization.

Keywords: smart grid, machine learning, load forecasting, energy management, reinforcement learning

DESIGN AND ANALYSIS OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS

Dr. Reza Alizadeh

Department of Civil and Environmental Engineering, Sharif University of Technology, Iran

Ali Nazari

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran

Samira Mohammadi

Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Iran

ABSTRACT

This paper presents an integrated framework for the design and analysis of structural health monitoring (SHM) systems in civil and mechanical infrastructure. The study begins by reviewing key SHM objectives—damage detection, localization, severity assessment, and prognosis—and summarizes common sensing technologies, including accelerometers, strain gauges, fiber-optic sensors, and vision-based systems. A systematic methodology is proposed that links sensor placement, data-acquisition strategies, and damage-sensitive feature selection to the operational and environmental conditions of the monitored structure. Using numerical models and experimental data from bridges and tall buildings, the authors compare vibration-based modal analysis, impedance-based methods, and machine-learning-driven pattern recognition techniques for detecting stiffness loss and crack initiation. Particular emphasis is placed on dealing with noise, temperature effects, and incomplete measurements, for which Bayesian updating and data-fusion approaches are introduced. The paper also discusses practical issues such as power supply, wireless communication constraints, and long-term system reliability. Case studies demonstrate that well-designed SHM systems can significantly reduce inspection costs, improve safety margins, and extend service life by enabling condition-based maintenance. Finally, the authors outline future research directions, including digital twins, edge computing for on-site diagnostics, and the integration of SHM data into asset-management decision tools.

Keywords: structural health monitoring, sensors, damage detection, vibration analysis, data fusion

RECENT DEVELOPMENTS IN RENEWABLE ENERGY HARVESTING METHODS

Assis. Prof. Dr. Farhad Mousavi

Department of Energy Engineering, University of Tehran, Iran

Dr. Leyla Tabrizi

School of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

Nima Shariati

Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Hamid Rezaei

Faculty of Engineering, Shiraz University, Iran

ABSTRACT

This paper reviews recent developments in renewable energy harvesting methods, with an emphasis on integrated solutions that combine multiple resources and advanced power-conversion technologies. The study surveys progress in solar photovoltaic and solar-thermal systems, onshore and offshore wind, small-scale hydropower, and emerging technologies such as piezoelectric, thermoelectric, and vibration-based harvesters. For each technology, key innovations in materials, device architecture, and control strategies are discussed, highlighting improvements in conversion efficiency, reliability, and adaptability to variable environmental conditions. Special attention is given to hybrid systems—for example, solar-wind or solar-biomass configurations—that aim to provide more stable power output for off-grid communities and microgrids. The paper also examines maximum power-point tracking algorithms, multi-input converters, and energy-storage integration as critical enablers of efficient harvesting. Environmental and socio-economic aspects, including land use, resource intermittency, and local manufacturing capacity, are briefly considered to contextualize technical advances. Case studies from pilot projects demonstrate that properly designed hybrid and smart-controlled systems can significantly enhance capacity factors and reduce levelized cost of energy compared to single-source installations. The authors conclude that future research should prioritize reliability under harsh conditions, recyclability of components, and system-level optimization that accounts for demand profiles and grid constraints.

Keywords: renewable energy, energy harvesting, hybrid systems, power conversion, microgrids

APPLICATION OF IOT IN INDUSTRIAL AUTOMATION AND CONTROL

Prof. Dr. Muhammad Aslam

Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Sciences and Technology (NUST), Pakistan

Dr. Zara Khan

Department of Industrial Engineering, University of Engineering and Technology Lahore, Pakistan

ABSTRACT

This paper examines the application of the Internet of Things (IoT) in industrial automation and control, focusing on how connected sensing, communication, and analytics can enhance efficiency, flexibility, and safety in manufacturing environments. The study outlines a layered reference architecture comprising field devices, edge gateways, cloud platforms, and enterprise applications, and describes communication protocols commonly used in industrial IoT, such as MQTT, OPC UA, and time-sensitive networking. Through illustrative use cases—predictive maintenance of rotating machinery, real-time monitoring of production lines, and energy-aware control of utilities—the paper demonstrates how IoT systems enable fine-grained visibility into process conditions and support data-driven decision-making. Particular emphasis is placed on edge computing, which allows local preprocessing, anomaly detection, and low-latency control while reducing bandwidth requirements and improving resilience to connectivity disruptions. The authors also discuss cyber-security and privacy challenges, introducing strategies such as network segmentation, secure device provisioning, and anomaly-based intrusion detection. Implementation barriers, including legacy equipment integration and workforce skills gaps, are analyzed based on experiences from pilot deployments in small and medium manufacturing enterprises. The paper concludes that successful adoption of industrial IoT requires not only appropriate technology choices but also organizational change, clear governance frameworks, and sustained collaboration between operations, IT, and management.

Keywords: Internet of Things, industrial automation, edge computing, predictive maintenance, cyber-security

DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR DEFECT DETECTION IN MANUFACTURING

Asif Malik

Department of Computer Science, University of Karachi, Pakistan

Dr. Sana Qureshi

Department of Industrial and Manufacturing Engineering, NED University of Engineering
and Technology, Pakistan

Amna Tariq

Department of Electrical Engineering, University of Karachi, Pakistan

Prof. Dr. Kamran Siddiqi

Faculty of Engineering, NED University of Engineering and Technology, Pakistan

Imran Javed

Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology,
Pakistan

ABSTRACT

This paper investigates the use of deep learning techniques for automated defect detection in manufacturing processes, with an emphasis on vision-based inspection of surfaces, components, and assemblies. Traditional rule-based image-processing methods often struggle with variations in illumination, texture, and defect appearance, leading to inconsistent performance and high manual-tuning costs. In contrast, convolutional neural networks and related architectures can learn discriminative features directly from labeled datasets, enabling robust detection of subtle and complex defects. The study presents a systematic workflow that includes dataset acquisition and augmentation, network selection and training, and deployment on embedded hardware for real-time operation. Several architectures, including ResNet, U-Net, and YOLO-style detectors, are compared on benchmark datasets representative of metal surface inspection, printed-circuit-board analysis, and packaging quality control. Experimental results show that deep learning models achieve significantly higher detection accuracy and lower false-alarm rates than conventional approaches, particularly when combined with transfer learning and domain-specific augmentation strategies. The paper also addresses practical challenges such as limited labeled data, explainability of model decisions, and integration with existing quality-management systems. Hybrid human-in-the-loop workflows are proposed to handle ambiguous cases and continuously improve model performance. The authors conclude that deep learning has the potential to transform industrial inspection from labor-intensive, reactive practices into proactive, data-driven quality assurance.

Keywords: deep learning, defect detection, computer vision, quality control, manufacturing

ADVANCED ROBOTICS FOR PRECISION AGRICULTURE

Dr. Carolina Ruiz

Department of Agricultural Engineering, University of São Paulo, Brazil

Prof. Dr. Enrique Mendoza

School of Mechanical and Electrical Engineering, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Mexico

Luis Torres

Department of Robotics and Automation, Monterrey Institute of Technology and Higher Education (ITESM), Mexico

ABSTRACT

This paper explores the deployment of advanced robotics in precision agriculture, focusing on field operations such as site-specific fertilization, targeted pesticide application, selective harvesting, and crop monitoring. The study surveys the current state of ground and aerial robotic platforms, including autonomous tractors, mobile manipulators, and unmanned aerial vehicles equipped with multi-spectral and thermal sensors. A conceptual framework is proposed that links robotic capabilities—navigation, perception, manipulation, and coordination—to agronomic objectives like yield optimization, resource efficiency, and reduction of chemical inputs. Case studies from experimental farms in Latin America demonstrate how simultaneous localization and mapping, machine-vision-based plant recognition, and variable-rate application algorithms can be integrated into robust field systems. The paper analyzes technical challenges arising from unstructured outdoor environments, including uneven terrain, dynamic obstacles, and changing illumination, and discusses how sensor fusion and adaptive control strategies can mitigate these issues. Socio-economic aspects, such as farm size, labor availability, and technology cost, are considered to evaluate the feasibility of large-scale adoption in both industrial and smallholder contexts. The authors argue that advanced agricultural robotics, when combined with agronomic expertise and data analytics, can significantly contribute to sustainable food production under climate and market uncertainties. However, they emphasize the need for interoperable standards, local capacity building, and participatory design processes to ensure that robotic technologies align with farmers' needs and ecological constraints.

Keywords: precision agriculture, agricultural robotics, autonomous vehicles, crop monitoring, variable-rate application

SMART TRANSPORTATION SYSTEMS AND TRAFFIC MANAGEMENT USING AI

Assis. Prof. Dr. Ivan Morales

Department of Transportation Engineering, Polytechnic University of Madrid, Spain

María Gutierrez

Department of Computer Science, Complutense University of Madrid, Spain

ABSTRACT

This paper examines the application of artificial intelligence (AI) in smart transportation systems and traffic management, with a focus on urban environments facing congestion, pollution, and safety challenges. The study begins by describing the architecture of intelligent transportation systems, including sensor networks, connected vehicles, control centers, and traveler-information services. It then reviews AI methods used for traffic prediction, signal control, incident detection, and dynamic route guidance, highlighting machine-learning and reinforcement-learning algorithms that can adapt to changing conditions. Case studies from simulated and real-world corridors demonstrate that AI-driven adaptive signal control can reduce average travel times and emissions compared to fixed-time plans, while deep-learning-based incident detection improves response times to accidents and breakdowns. The paper also explores the integration of data from connected vehicles and mobile devices, which provides high-resolution information but raises privacy and cyber-security concerns. Strategies for anonymization, secure communication, and fail-safe system design are discussed. Finally, the authors consider institutional and regulatory barriers, such as fragmented responsibilities among agencies and the need for standardized data platforms, which can hinder AI adoption. They conclude that AI-enabled traffic management can play a central role in sustainable urban mobility, provided that technological innovation is accompanied by governance reforms and stakeholder engagement.

Keywords: smart transportation, artificial intelligence, traffic management, connected vehicles, adaptive signal control

SUSTAINABLE WATER RESOURCE MANAGEMENT IN AFRICAN URBAN AREAS

Dr. Samuel Okoro

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Lagos, Nigeria

ABSTRACT

This paper examines the challenges and opportunities associated with sustainable water resource management in rapidly growing African urban areas. Many cities on the continent face a combination of aging infrastructure, informal settlement expansion, climate-induced variability in rainfall, and institutional fragmentation, all of which undermine reliable and equitable water provision. The study adopts a mixed-methods approach, combining analysis of policy documents and service-coverage statistics from selected West and East African cities with interviews conducted with utility managers, local officials, and community representatives. Findings indicate that conventional centralized systems struggle to keep pace with urbanization, resulting in uneven access and over-extraction of groundwater, while intermittent supply increases the risk of contamination in distribution networks. However, the research also identifies promising practices, including decentralized rainwater harvesting, managed aquifer recharge, small-scale treatment plants, and pro-poor tariff structures supported by cross-subsidies. Particular attention is paid to governance arrangements: cities that integrate water planning with land-use regulation, participatory neighborhood upgrading, and transparent performance monitoring achieve more sustainable outcomes than those relying solely on technocratic, top-down solutions. The paper argues that sustainable urban water management in Africa requires a shift toward adaptive, hybrid systems that combine centralized infrastructure with community-based and nature-based solutions. It concludes by proposing a framework for policymakers that links demand management, ecosystem protection, and inclusive governance, emphasizing the need for capacity-building, climate-resilient investment, and regional knowledge sharing.

Key words: urban water management, Africa, sustainability, governance, climate resilience

ADVANCES IN WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGIES FOR AFRICAN COMMUNITIES

Kofi Mensah, Dr. Nana Yeboah, Abena Boateng

Department of Environmental Engineering, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Ghana

ABSTRACT

This paper reviews recent advances in waste-to-energy (WtE) technologies and evaluates their suitability for deployment in African communities facing mounting municipal solid-waste and energy-access challenges. Rapid urbanization and changing consumption patterns have increased waste generation across African cities, while electricity grids remain unreliable or inaccessible in many peri-urban and rural areas. The study synthesizes technical and socio-economic evidence on a spectrum of WtE options, including anaerobic digestion, small-scale incineration with energy recovery, gasification, and co-processing in existing industrial plants. Drawing on case studies from Ghana, Kenya, and South Africa, the paper compares capital and operating costs, feedstock requirements, emissions profiles, and local job-creation potential. The analysis shows that decentralized anaerobic digestion and modular gasification units are particularly promising for medium-sized municipalities and agro-industrial clusters, where organic waste streams are abundant and heat or electricity demand is relatively stable. However, successful implementation depends on reliable waste-segregation systems, appropriate regulatory standards, and long-term financing mechanisms. Social acceptance emerges as a critical factor: projects that involve communities in planning, ensure transparent communication about environmental safeguards, and provide tangible co-benefits—such as affordable cooking gas or street lighting—are more likely to endure. The paper concludes that WtE should not be seen as a stand-alone solution but as part of integrated solid-waste management that prioritizes reduction, reuse, and recycling. Policy recommendations include developing clear national WtE strategies, fostering public–private partnerships, and supporting research on locally adapted, low-emission technologies.

Key words: waste-to-energy, solid-waste management, Africa, renewable energy, anaerobic digestion

ASSESSING SOIL REMEDIATION TECHNIQUES IN KYRGYZSTAN'S INDUSTRIAL ZONES

Assoc. Prof. Dr. Aida Sadykova, Ermek Nurtaziev, Bakytbek Osmonov

Department of Environmental Science, Kyrgyz National University, Kyrgyzstan

ABSTRACT

This paper evaluates the effectiveness and feasibility of soil-remediation techniques applied in industrial zones of Kyrgyzstan affected by mining, metallurgy, and chemical production. Decades of poorly regulated industrial activity have left contaminated hotspots with elevated levels of heavy metals, hydrocarbons, and other persistent pollutants, posing risks to human health and surrounding ecosystems. The study combines field sampling and laboratory analysis with a review of pilot projects and remediation plans implemented in selected sites near Bishkek, Osh, and former mining settlements. Techniques assessed include soil excavation and secure landfilling, in-situ stabilization/solidification, phytoremediation using native plant species, and soil washing with chelating agents. Results indicate that while excavation provides rapid risk reduction, it is costly and merely transfers contaminants to another location, raising issues of long-term storage and monitoring. Stabilization reduces metal mobility but requires careful control of additives and may limit future land use. Phytoremediation emerges as a cost-effective option for large, moderately contaminated areas, though it demands multi-year commitment and robust biomass-management strategies. The research highlights institutional and financial constraints, including limited enforcement capacity, fragmented responsibility among agencies, and insufficient public awareness of soil-contamination risks. The paper argues for an integrated remediation framework that prioritizes risk-based decision-making, combines technologies according to local conditions, and incorporates community participation in planning and monitoring. It concludes with recommendations for developing national guidelines, strengthening environmental liability mechanisms, and promoting international cooperation to address legacy pollution in Kyrgyzstan's industrial zones.

Key words: soil remediation, industrial pollution, Kyrgyzstan, heavy metals, phytoremediation

AIR POLLUTION IMPACTS ON PUBLIC HEALTH IN KYRGYZSTAN URBAN CENTERS

Dr. Gulnara Toktogonova, Assis. Prof. Dr. Mirlan Bektemirov
School of Public Health, Kyrgyz State Medical Academy, Kyrgyzstan

ABSTRACT

This study investigates the health impacts of urban air pollution in major Kyrgyzstani cities, with a primary focus on Bishkek and Osh. Rapid motorization, reliance on coal and low-quality fuels for heating, and outdated industrial facilities have led to frequent exceedances of particulate-matter and nitrogen-oxide standards, particularly during winter inversion episodes. The research integrates air-quality monitoring data with hospital admission records and community health surveys to estimate the burden of respiratory and cardiovascular diseases attributable to ambient pollution. Time-series and regression analyses reveal statistically significant associations between short-term increases in PM_{2.5} concentrations and hospital visits for asthma, bronchitis, and ischemic heart disease, even after controlling for temperature, seasonal trends, and socio-economic factors. Vulnerable populations—including children, the elderly, and residents of informal settlements near major roads or industrial sites—are disproportionately affected. Qualitative interviews highlight limited public awareness of pollution risks and constrained capacity for behavioral adaptation, such as the use of cleaner heating technologies or avoidance of outdoor activity during high-pollution episodes. The paper argues that addressing urban air pollution in Kyrgyzstan requires a combination of regulatory and public-health measures, including stricter emission standards for vehicles and small boilers, phased reduction of coal use, and expansion of public transport. Health-impact assessments should be systematically integrated into urban-planning and energy-policy decisions. The study concludes that investing in cleaner air would yield substantial co-benefits in terms of reduced healthcare costs, improved labor productivity, and enhanced quality of life.

Key words: air pollution, public health, Kyrgyzstan, urban environment, particulate matter

EVALUATION OF SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEMS IN YEMEN

Faisal Al-Hadhrami

Department of Environmental Engineering, Sana'a University, Yemen

ABSTRACT

This paper evaluates existing solid-waste management systems in selected Yemeni cities under conditions of protracted conflict and economic instability. Municipalities face severe constraints in collection coverage, disposal practices, and institutional capacity, leading to uncontrolled dumping, open burning, and growing public-health risks. The study employs field observations, stakeholder interviews, and analysis of municipal records from Sana'a, Aden, and Taiz to assess system performance across the waste-management chain: generation, collection, transfer, recycling, and final disposal. Findings reveal highly fragmented services, with formal collection limited to central districts and informal waste-pickers playing a crucial yet unrecognized role in recovering recyclable materials. Existing dumpsites lack basic engineering controls, resulting in leachate contamination and vector proliferation. Despite these challenges, local initiatives—such as community-based collection schemes, NGO-supported recycling projects, and small composting operations—demonstrate potential pathways for incremental improvement. The paper argues that realistic strategies for Yemen must prioritize low-cost, labor-intensive approaches that build on existing informal practices while gradually strengthening regulatory frameworks and technical standards. Recommended measures include formalizing and protecting the role of waste-pickers, promoting source separation for organics and recyclables, and developing simple sanitary-landfill cells where security conditions allow. The study concludes that even in fragile contexts, targeted interventions and donor-supported capacity-building can significantly reduce environmental and health impacts of solid waste, laying groundwork for more comprehensive systems in the future.

Key words: solid-waste management, Yemen, informal sector, dumpsites, fragile states

STRATEGIES FOR MITIGATING WATER POLLUTION IN YEMENI AGRICULTURE

Dr. Hana Mohammed, Saeed Al-Saadi, Assoc. Prof. Dr. Lubna Al-Din

Department of Environmental Science, University of Sana'a, Yemen

ABSTRACT

This study analyzes sources of water pollution linked to agricultural practices in Yemen and proposes mitigation strategies tailored to the country's water-scarce and conflict-affected context. Unsustainable groundwater abstraction, intensive use of chemical fertilizers and pesticides, and inadequate management of livestock waste have degraded surface and groundwater quality in key farming regions. The research combines water-quality sampling from wells and irrigation canals with farmer surveys and policy-document review to identify pollution hotspots and institutional gaps. Results reveal elevated nitrate, salinity, and pesticide residues in many irrigation sources, exceeding recommended thresholds for drinking and, in some cases, for crop irrigation. Farmers often lack access to extension services and rely on short-term yield maximization, unaware of cumulative impacts on soil and water resources. The paper evaluates potential interventions, including integrated pest-management practices, controlled fertilizer application, promotion of drought-tolerant and less input-intensive crops, and adoption of localized irrigation systems that reduce leaching and runoff. Policy recommendations emphasize the need to strengthen water-quality monitoring, incentivize good agricultural practices through subsidies or credit schemes, and integrate water-pollution control into broader national water-security strategies. The study concludes that protecting Yemen's limited water resources requires coordinated efforts among agricultural, water, and environmental institutions, as well as engagement with local communities and traditional water-management structures.

Key words: water pollution, agriculture, Yemen, groundwater quality, best management practices

MONITORING ENVIRONMENTAL CHANGES USING REMOTE SENSING IN ERITREA

Prof. Dr. Teklemariam Haile, Dawit Gebreselassie, Dr. Selam Kidane

Department of Earth and Environmental Sciences, Eritrea Institute of Technology, Eritrea

ABSTRACT

This paper demonstrates the application of remote-sensing and geographic-information-system (GIS) techniques for monitoring environmental changes in Eritrea, a country characterized by diverse ecosystems and increasing pressure from climate variability and human activities. Using multi-temporal satellite imagery from Landsat and Sentinel missions, the study analyzes land-cover change, vegetation dynamics, and shoreline variation over the past three decades in selected highland, lowland, and coastal areas. Standardized indices, including the Normalized Difference Vegetation Index and land-surface-temperature metrics, are combined with supervised classification and change-detection algorithms to quantify trends in deforestation, agricultural expansion, urban growth, and land degradation. Results indicate significant loss of natural vegetation in densely populated highland zones, localized expansion of irrigated agriculture in lowland plains, and observable coastal changes linked to erosion and infrastructure development. Ground-truthing through field visits and consultation with local experts confirms the main patterns and provides contextual interpretation. The paper argues that remote sensing offers cost-effective, timely information for environmental planning in countries with limited ground-monitoring networks. It recommends institutionalizing regular satellite-based assessments within national agencies, integrating remote-sensing data with community-based observations, and using the outputs to support land-use planning, climate-adaptation strategies, and disaster-risk reduction. The study concludes that strengthening technical capacity in remote sensing and GIS is essential for evidence-based environmental governance in Eritrea.

Key words: remote sensing, environmental change, Eritrea, GIS, land-cover monitoring

MATERNAL HEALTHCARE ACCESS AND SOCIOECONOMIC BARRIERS AMONG WOMEN IN RURAL KYRGYZSTAN

Prof. Dr. Meerim Aitmatova

Department of Public Health, Kyrgyz State Medical Academy, Kyrgyzstan

Dr. Bakytgul Uulu

Faculty of Medicine, Osh State University, Kyrgyzstan

ABSTRACT

This study examines maternal healthcare access and the socioeconomic barriers faced by women living in rural regions of Kyrgyzstan, where geographic isolation, limited infrastructure, and persistent poverty converge to shape pregnancy outcomes. Using a mixed-methods design, the research combines facility-based surveys with in-depth interviews and focus groups conducted in several villages across two provinces. Quantitative data capture patterns of antenatal visits, facility-based deliveries, out-of-pocket expenditures, and delays in seeking or receiving care, while qualitative narratives illuminate how gender roles, household bargaining, and trust in health institutions influence women's decisions. The findings show that although national policies have expanded formal coverage for maternal services, many rural women still encounter significant financial obstacles, including informal payments, transport costs, and lost income from farm or household work. Distance to facilities, seasonal road conditions, and shortages of female providers further discourage timely care-seeking. Social norms that prioritize husbands' and elders' approval can delay decisions to seek emergency obstetric care, and previous negative experiences with disrespectful treatment reduce willingness to return. Nevertheless, the study also identifies local resilience strategies, such as community-based savings groups, informal transport networks, and midwife-led outreach, which partially mitigate structural constraints. The paper argues that effective improvement of maternal health in rural Kyrgyzstan requires not only increased investment in infrastructure and human resources but also targeted interventions that reduce hidden costs, strengthen respectful maternity care, and involve families and community leaders in health promotion. Recommendations include developing context-specific voucher schemes, expanding mobile clinics, and integrating gender-sensitive counseling into existing primary healthcare programs.

Keywords: maternal healthcare, rural Kyrgyzstan, socioeconomic barriers, access to care, gender norms

PERCEPTIONS AND PRACTICES OF ANTENATAL NUTRITION AMONG PREGNANT WOMEN IN BISHKEK

Dr. Nurgul Isaeva

Department of Nutrition and Dietetics, Kyrgyz State Medical Academy, Kyrgyzstan

Zamira Sadykova

School of Public Health, International University of Kyrgyzstan, Kyrgyzstan

Gulzat Sultanalieva

Faculty of Medicine, Kyrgyz Russian Slavic University, Kyrgyzstan

ABSTRACT

This paper explores perceptions and practices related to antenatal nutrition among pregnant women attending urban clinics in Bishkek, Kyrgyzstan. Despite improvements in food availability and healthcare coverage, micronutrient deficiencies and suboptimal gestational weight gain remain prevalent in the country. To understand the underlying behavioral and cultural determinants, the study employs a cross-sectional survey of pregnant women in their second and third trimesters, complemented by semi-structured interviews with a purposive subsample. The survey assesses dietary diversity, supplement use, food taboos, sources of nutrition information, and perceived barriers to healthy eating. Results indicate that most participants recognize the importance of “eating well for the baby,” yet their understanding of specific nutrient needs—such as iron, folate, and calcium—is often limited or inconsistent. Many women report relying on advice from mothers, friends, and social media rather than from healthcare professionals, and clinic-based counseling is frequently described as brief and generic. Economic constraints, time pressure due to employment, and limited cooking facilities in shared apartments further hinder adherence to recommended diets. The qualitative data highlight the persistence of pregnancy-related food restrictions, including avoidance of certain fruits, cold foods, or spicy dishes, which some women perceive as protective despite lacking biomedical justification. The study concludes that interventions to improve antenatal nutrition in Bishkek should combine strengthened, individualized counseling within antenatal care, community-level education that respectfully addresses food beliefs, and policies that increase access to affordable, nutrient-dense foods. Tailored communication strategies using digital platforms may be particularly effective for younger, urban women.

Keywords: antenatal nutrition, pregnant women, Kyrgyzstan, dietary practices, health education

PSYCHOSOCIAL STRESSORS AND COPING STRATEGIES AMONG PREGNANT WOMEN IN THE WEST BANK

Assoc. Prof. Dr. Lina Barghouti

Faculty of Public Health, Birzeit University, Palestine

Dr. Hala Najjar

Faculty of Medicine and Health Sciences, An-Najah National University, Palestine

ABSTRACT

This study investigates psychosocial stressors and coping strategies among pregnant women living in the West Bank, a context marked by political instability, movement restrictions, and economic insecurity. Using a mixed-methods design, the research surveys women in their second and third trimesters attending primary healthcare clinics, and conducts in-depth interviews with a subset of participants. Standardized scales are used to measure perceived stress, depressive symptoms, and social support, while open-ended questions explore experiences of daily life, pregnancy-related worries, and sources of resilience. Findings reveal that women commonly report stressors such as checkpoints and travel delays, financial strain, concerns about access to emergency obstetric care, and anxiety about their children's future in an unstable environment. Family obligations and expectations around ideal motherhood add further emotional pressure. At the same time, many participants describe strong coping resources, including extended family networks, religious faith, and peer support from other pregnant women. Prayer, recitation, and religious gatherings are frequently cited as mechanisms that provide both emotional comfort and a sense of collective endurance. The study highlights the dual role of social networks as supportive yet occasionally controlling, particularly when relatives minimize women's emotional distress or discourage open discussion of mental health. The article argues that antenatal services in the West Bank should systematically integrate psychosocial assessment, strengthen referral pathways for mental-health care, and collaborate with community and faith-based organizations to deliver culturally sensitive interventions. Such approaches could help mitigate the intergenerational impacts of chronic stress on maternal and infant health.

Keywords: pregnancy, psychosocial stress, coping strategies, West Bank, maternal mental health

BARRIERS TO ADEQUATE PRENATAL CARE IN GAZA: PERSPECTIVES OF WOMEN AND HEALTH PROVIDERS

Dr. Abeer Khalil

Faculty of Public Health, Islamic University of Gaza, Palestine

Mohammed Saleh

School of Public Health, Al-Quds University, Palestine

Ayah Abu Seir

Faculty of Nursing, Islamic University of Gaza, Palestine

ABSTRACT

This paper explores barriers to adequate prenatal care in the Gaza Strip from the perspectives of pregnant women and frontline health providers. The enclave's protracted blockade, recurrent conflicts, and fragile health infrastructure create a challenging environment for delivering essential maternal services. The study employs a qualitative design, conducting focus-group discussions with pregnant and recently delivered women attending public clinics, alongside semi-structured interviews with physicians, midwives, and clinic managers. Participants identify multiple intersecting barriers: overcrowded facilities, long waiting times, drug and supply shortages, and frequent electricity cuts that disrupt diagnostic services. Women also report financial difficulties related to transportation and laboratory tests, as well as psychosocial barriers including fear of negative staff attitudes and reluctance to disclose sensitive information. Providers describe high workloads, limited opportunities for professional development, and stress associated with working under resource scarcity and security threats. Despite these challenges, many health workers express strong commitment to their patients and adopt improvisational strategies, such as flexible scheduling and informal phone consultations, to maintain continuity of care. The analysis indicates that structural constraints interact with social norms—such as husbands' control over mobility and health spending—to shape women's access to timely, comprehensive prenatal services. The paper argues for multi-level interventions, including targeted support for primary-care facilities, improved staff training in respectful maternity care, and community-based programs that engage men and families in recognizing the value of prenatal care. Enhanced coordination between local authorities, international agencies, and civil-society organizations is essential to safeguard maternal health in this highly constrained setting.

Keywords: prenatal care, Gaza, health-system barriers, women's perspectives, respectful care

IMPACT OF WOMEN'S EDUCATION ON MATERNAL AND INFANT HEALTH OUTCOMES IN SINGAPORE

Dr. Cheryl Tan

Saw Swee Hock School of Public Health, National University of Singapore, Singapore

Liew Wei Ling

Department of Statistics and Data Science, National University of Singapore, Singapore

Prof. Dr. Siti Rahimah

Duke-NUS Medical School, Singapore

Dr. Jasmine Goh

KK Women's and Children's Hospital, Singapore

ABSTRACT

This study analyzes the impact of women's educational attainment on maternal and infant health outcomes in Singapore, a high-income city-state with universal access to healthcare but persistent socioeconomic gradients in health. Using a retrospective cohort design, the research links national perinatal registry data with census-based education records for a large sample of births over a ten-year period. Outcomes examined include gestational age at delivery, birth weight, mode of delivery, breastfeeding initiation, and postpartum complications, while controlling for maternal age, parity, ethnicity, and household income. Quantitative findings show a clear educational gradient: higher maternal education is associated with lower risk of preterm birth and low birth weight, higher rates of exclusive breastfeeding at discharge, and reduced incidence of certain obstetric interventions and complications. To illuminate underlying mechanisms, the study also incorporates qualitative interviews with mothers from different educational backgrounds. These narratives suggest that education enhances health literacy, confidence in navigating healthcare systems, and ability to critically assess information from diverse sources. Educated women are more likely to engage in shared decision-making with providers, seek second opinions when needed, and adopt recommended health behaviors before and during pregnancy. However, the research also highlights that structural factors—such as demanding work schedules, childcare support, and workplace maternity policies—mediate how educational advantages translate into health outcomes. The paper concludes that policies aiming to improve maternal and infant health should consider both educational investment across the life course and targeted support for less-educated mothers, including tailored antenatal education and community outreach.

Keywords: women's education, maternal health, infant outcomes, Singapore, health inequality

CULTURAL INFLUENCES ON CONTRACEPTIVE USE DECISIONS AMONG SINGAPOREAN WOMEN

Assoc. Prof. Dr. Sharon Lee

Department of Sociology, National University of Singapore, Singapore

Samantha Tan

Centre for Population Health Research, National University Health System, Singapore

ABSTRACT

This paper examines how cultural norms and social expectations shape contraceptive use decisions among women in Singapore, a multi-ethnic society with low fertility and diverse religious traditions. Drawing on in-depth interviews and focus groups with women aged 20–40 from Chinese, Malay, Indian, and other backgrounds, the study explores attitudes toward sexuality, ideal family size, and responsibility for pregnancy prevention. The findings reveal that while most participants are aware of a wide range of modern contraceptive methods, their choices are strongly influenced by cultural scripts concerning femininity, marital duty, and intergenerational expectations. Married women often describe subtle pressure from parents and in-laws to “prove fertility” early in marriage, leading to delayed uptake of reliable contraception. For some, religious teachings and community discourses frame certain methods—such as long-acting reversible contraception or emergency contraception—as morally suspect, even when they are medically recommended. Younger, unmarried women report concerns about stigma and confidentiality when seeking contraceptive services, which can result in inconsistent condom use or reliance on less effective methods. The study also shows that healthcare providers’ communication styles and perceived moral judgments play a significant role in women’s experiences; culturally sensitive counseling can empower informed decisions, whereas dismissive encounters deter care-seeking. The paper concludes that contraceptive policies in Singapore must go beyond ensuring physical availability of methods to engaging with the cultural and relational contexts in which decisions are made. It recommends provider training in non-judgmental counseling, community dialogues that involve men and older family members, and nuanced public-health messaging that acknowledges moral diversity while promoting reproductive autonomy.

Keywords: contraception, cultural norms, Singaporean women, reproductive autonomy, fertility decisions

PREGNANCY-RELATED HEALTH LITERACY AND OUTCOMES IN OMANI WOMEN

Assis. Prof. Dr. Maha Al-Rashdi

College of Nursing, Sultan Qaboos University, Oman

ABSTRACT

This study investigates pregnancy-related health literacy among Omani women and its association with selected maternal and neonatal outcomes. Health literacy is conceptualized as the ability to access, understand, evaluate, and apply health information in order to make informed decisions during pregnancy. A cross-sectional survey was conducted with pregnant and recently delivered women attending antenatal and postnatal clinics in Muscat and two regional hospitals. A validated maternal health-literacy scale was used alongside questions on information sources, decision-making preferences, and perceived confidence in interacting with healthcare professionals. Clinical data on timing of first antenatal visit, gestational complications, mode of delivery, and birth weight were extracted from medical records. The results show considerable variation in health-literacy levels, with higher scores among women with tertiary education, urban residence, and prior exposure to antenatal education classes. Women with adequate literacy were more likely to initiate antenatal care in the first trimester, adhere to supplement regimens, recognize danger signs, and report shared decision-making with providers. Conversely, limited literacy was associated with delayed care, greater anxiety, and higher rates of potentially avoidable interventions. Many participants identified husbands and female relatives as key intermediaries in interpreting medical information, underscoring the collective nature of health decisions. The study concludes that strengthening pregnancy-related health literacy should be a priority for maternal-health programs in Oman. Suggested strategies include integrating interactive education into routine antenatal visits, developing culturally appropriate visual and digital materials in Arabic and English, and training healthcare staff to assess and respond to differing literacy levels.

Keywords: health literacy, pregnancy, Oman, maternal outcomes, antenatal education

SOCIAL SUPPORT NETWORKS AND MATERNAL WELL-BEING DURING PREGNANCY IN OMAN

Assis. Prof. Dr. Abdullah Al-Balushi

College of Medicine and Health Sciences, Sultan Qaboos University, Oman

Dr. Salima Al-Yahyaei

College of Nursing, University of Nizwa, Oman

Huda Al-Shukaili

Department of Psychology, University of Nizwa, Oman

ABSTRACT

This paper explores the relationship between social support networks and maternal well-being during pregnancy among Omani women. Recognizing that pregnancy is both a biological and social transition, the study assesses how emotional, informational, and practical support from family, peers, and healthcare providers influence psychological health and perceived preparedness for motherhood. A mixed-methods approach is used: standardized questionnaires measuring perceived social support and depressive symptoms are administered to pregnant women in their second and third trimesters, and follow-up interviews are conducted with a subset to gain deeper insight into support dynamics. Quantitative results indicate that higher levels of perceived support, particularly from spouses and mothers, are associated with lower depressive scores and greater satisfaction with pregnancy. Qualitative data reveal that extended family networks provide substantial practical assistance, such as help with household tasks and childcare for older children, yet they can also impose conflicting advice and expectations that contribute to stress. Women describe the importance of empathetic communication with healthcare professionals, noting that respectful listening and clear explanations can offset anxieties, whereas rushed or judgmental encounters undermine trust. The study highlights emerging forms of peer support through online groups, which offer anonymity and shared experience but may also disseminate inaccurate information. The paper concludes that interventions to promote maternal well-being in Oman should harness existing family support structures while addressing their potential strains, strengthen provider training in psychosocial care, and guide the development of reliable digital communities for pregnant women.

Keywords: social support, maternal well-being, pregnancy, Oman, mental health

